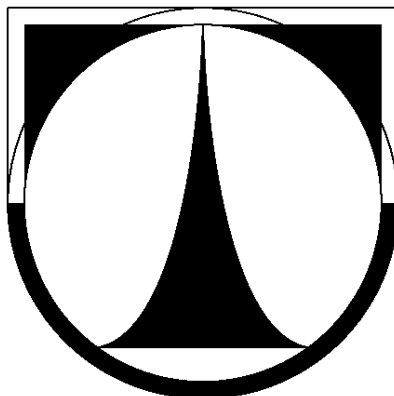


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Liberec, 2009

Vít Kirschner



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program B2341 – Strojírenství

Materiály a technologie
zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

**Stanovení vlivu mechanických hodnot materiálu na velikost
odpružení**

**Determination of the effect of material mechanical properties
on the size of the spring-back**

Vít Kirschner

KSP – TP – B58

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce: Ing. Pavel Doubek, Ph.D.

Rozsah práce a příloh:

Počet stran	74
Počet tabulek	16
Počet obrázků	42
Počet příloh	6

Datum: 5. 6. 2009



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení	Vít K I R S C H N E R
Studijní program	B2341 Strojírenství
Studijní obor	3911R018 Materiály a technologie
Zaměření	Tváření kovů a plastů

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje bakalářská práce na téma:

Stanovení vlivu mechanických hodnot materiálu na velikost odpružení

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle bakalářské práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Seznámení se s výrobním programem a problematikou při ohýbaní plechů ve firmě Auto Závod Český Dub, spol. s r.o..
2. Vliv technologických parametrů na velikost odpružení a možnosti eliminace odpružení.
3. U vybraného dílu experimentální zjištění velikosti odpružení pro různé výrobní série.
4. Stanovení rozptylu mechanických hodnot zpracovávaného materiálu.
5. Na základě provedených experimentálních měření stanovit vliv mechanických hodnot zpracovávaného materiálu na velikost odpružení.
6. Získané výsledky měření ověřit při praktické výrobě v Auto Závod Český Dub, spol. s r.o.
7. Závěr

A N O T A C E
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program: B2341 – Strojírenství

Student: Vít Kirschner

Téma práce: Stanovení vlivu mechanických hodnot materiálu na velikost odpružení

Determination of the effect of material mechanical properties on the size of the spring-back

Číslo BP: KSP – TP – B58

Vedoucí BP: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D. - *TU v Liberci*

Konzultant BP: Ing. Pavel Doubek, Ph.D. - *TU v Liberci*

Abstrakt:

Bakalářská práce se zabývá problematikou odpružení při ohýbání plechu z materiálu S235JR EN 10025-2. Úkolem práce je stanovit vliv mechanických hodnot materiálu na velikost odpružení. Dále pak posoudit existenci závislosti velikosti odchylek požadovaného rozměru na mechanických hodnotách tvářeného materiálu při výrobě blatníku pro vysokozdvizný vozík. Experiment by měl objasnit, jaký je hlavní důvod odchylek požadovaného rozměru při ohýbání dílu na hydraulickém lisu.

Abstract:

The bachelor thesis deals with the spring-back in the bending of sheet material S235JR EN 10025-2. The task of this work is to establish the effect of material mechanical properties on the size of the spring-back. Furthermore, the aim is to assess the existence of dependence of the deviation size of the dimensions on the mechanical values of formed material on the wings of fork-lift trucks. The experiment should clarify what is the main reason for deviations of the dimension during the part bending on the hydraulic press.

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 5. 6. 2009

.....

Vít Kirschner

Sněhurčina 712/77

46015 Liberec 15

Poděkování:

V úvodu bych chtěl poděkovat mému vedoucímu bakalářské práce Ing. Pavlu Solfronkovi Ph.D. a konzultantovi Ing. Pavlu Doubkovi, Ph.D. za jejich odborné vedení, rady a věcné připomínky, díky kterým jsem se mohl lépe orientovat v celé problematice při vypracování předkládané bakalářské práce.



Obsah

1. Úvod	11
2. Teoretická část	12
2.1 Tváření kovů	12
2.1.1 Základní rozdělení pro technologii tváření ocelí	13
2.1.1.1 Tváření za studena	13
2.1.1.2 Tváření za tepla	13
2.1.1.3 Tváření za poloohřevu	14
2.1.2 Rozdělení tváření podle působení vnějších sil	14
2.1.2.1 Tváření objemové	14
2.1.2.2. Tváření plošné	14
2.2 Teorie plošného tváření – ohýbání	15
2.2.1 Charakteristika a základní rozdělení ohýbání	15
2.2.1.1 Rozdělení dle způsobu pohybu nástroje vzhledem k tvářenému materiálu	17
2.2.1.2 Rozdělení dle tvaru ohybu	18
2.2.1.3 Rozdělení dle velikosti poloměru zakřivení	18
2.2.2 Neutrální osa	18
2.2.3 Výpočet ohybového momentu a průběh při ohýbání tyčí a pásů	20
2.2.3.1 Ohýbání úzkých tyčí bez zpevnění	20
2.2.3.2 Ohýbání širokých pásů bez zpevnění	23
2.2.3.3 Ohýbání se zpevněním	24
2.2.4 Odpružení při ohybu	25
2.2.4.1 Odpružená křivost pro úzké tyče	27
2.2.4.2 Odpružená křivost pro široké pásy	27
2.2.4.3 Výpočet úhlového odpružení	27
2.2.4.4 Hlavní vlivy na děj odpružení	28
2.2.5 Eliminace odpružení při ohybu	28
2.2.6 Minimální a maximální poloměr ohybu	31
2.3 Anizotropie	32
2.4 Základní vlastnosti kovů a jejich zkoušení	33
2.4.1 Základní dělení vlastností kovů	33
2.4.2 Základní rozdělení zkoušek kovů	34
2.4.2.1. Mechanické zkoušky	34
3. Experimentální část	38
3.1. Technologický postup výroby blatníku	42



3.2. Postup měření	43
3.3. Změřené rozměry při výrobě blatníku po operaci ohnutí	46
3.3.1. Výpočet pravděpodobnosti splnění tolerance rozměru	48
3.4. Stanovení závislosti naměřených hodnot	50
3.4.1. Výpočet existence závislosti	50
3.5. Ověření výpočtu odpružení blatníku dle teorie	52
4. Závěr	54
5. Seznam použité literatury	55
6. Seznam příloh	56

**Seznam použitých značek, veličin a jednotek:**

Označení	Název	Jednotka
A_x	tažnost	[%]
b	šířka materiálu	[mm]
d	průměr podpory	[mm]
D	průměr zatěžujícího válečku při ohybu	[mm]
e	velikost obrazce pružné deformace	[mm]
E	Youngův modul pružnosti v tahu	[MPa]
F	síla	[N]
J	moment setrvačnosti	[mm ⁴]
KUT	komplexní ukazatel tvářítečnosti	[–]
l	délka středního oblouku	[mm]
Δl	prosté prodloužení	[–]
l_0	původní délka	[mm]
l_p	rozpětí podpěry	[mm]
l_U	konečná délka	[mm]
M	ohybový moment	[Nmm]
r, R, ρ	poloměry	[mm]
R_e	výrazná mez kluzu	[MPa]
R_m	smluvní mez pevnosti v tahu	[MPa]
$R_{p0,2}$	smluvní mez pevnosti	[MPa]
R_u	smluvní mez úměrnosti	[MPa]
R_{Ax}, R_{Ay}, R_{By}	reakční síly	[N]
s, t	tloušťka materiálu	[mm]
S	průřez tyčky v místě přetržení	[mm ²]
S_0	počáteční plocha příčného průřezu	[mm ²]
T	absolutní teplota	[K]
UH	ukazatel hlubokotažnosti materiálu	[–]
W	průřezový modul v ohybu	[mm ³]
x, y, z	pravoúhlé souřadnice	[mm]
x	součinitel pro určení polohy neutrální osy	[–]
y	průhyb	[mm]



Z	kontrakce, neboli poměrné zúžení	$[\%]$
ZP	zásoba plasticity	$[-]$
α	délková roztažnost	$[K^{-1}]$
α_x	úhel ohnutí	$[rad]$
$\Delta\alpha$	odpružení materiálu	$[rad]$
$\Delta\alpha^\circ$	odpružení materiálu	$[\circ]$
β	doplňkový úhel	$[\circ]$
ε	poměrné přetvoření	$[\%]$
ρ	měrná hustota	$[kg \cdot m^{-3}]$
λ	tepelná vodivost	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
μ	Poissonovo číslo	$[-]$
σ	skutečné normálové napětí	$[MPa]$
σ_k	okamžitá hodnota meze kluzu	$[MPa]$
σ_s	střední napětí	$[MPa]$
σ_p	přirozený přetvárný odpor	$[MPa]$
P	pravděpodobnost	$[\%]$
\bar{x}	střední hodnota	$[mm]$
$\bar{\sigma}_{(n-1)}$	výběrová střední směrodatná odchylka	$[mm]$
K_{xy}	korelace, kovariance	$[-]$
ρ_{xy}	koeficient kovariance	$[-]$
Y	regresivní funkce	$[-]$
r_{xy}	regresivní koeficient	$[-]$



1.Úvod

Strojírenský průmysl v České republice (ČR) má svoji dlouhodobou tradici. Samozřejmě nejvíce rozvíjejícím se a stěžejním odvětvím ve strojírenském průmyslu je automobilový i v době světové finanční krize. ČR má svou tradici v oblasti strojírenského průmyslu a je svou polohou atraktivní zemí z hlediska zahraničních investic. ČR dlouhodobě zaznamenává v tomto oboru růst kvality i produktivity práce. Strojírenství v ČR má obecně velice dobré renomé z hlediska kvality. Velký počet výrobků, nejen v automobilovém průmyslu, měl za následek rozšiřující se okruh dodavatelů ve strojírenském průmyslu. Hlavním cílem výrobců a jejich dodavatelů je zvýšení produktivity výroby, v důsledku snížení nákladů na výrobní operace a zvýšení kvality i přesnosti vyráběných dílů.

Při výrobě dílů jako jsou blatníky u vysokozdvizného vozíku, se používá technologie plošného tváření. Technologie ohýbání, lemování, rovnání, stříhání apod. Produkt, který projde tvářecím procesem, se dále používá v dalších výrobních a montážních sestavách. Je tedy nutné, aby byla dodržena tvarová a rozměrová přesnost výrobku. U technologie plošného tváření - ohýbání, je však dosažení požadované přesnosti složitější, protože dochází vždy k odpružení materiálu. Při navrhování výrobku a výrobního nástroje, se musí počítat s teoretickými hodnotami odpružení, které se často liší od skutečného odpružení. Velikost teoretického odpružení je nutné stanovit pomocí odborných literatur a experimentálních vzorců. Samotné odpružení lze i určitými způsoby eliminovat.

Problematické ohýbání, odpružení a hypotézám příčin odchylek od požadovaných rozměrů při výrobě blatníku pro vysokozdvizný vozík je věnována tato předkládaná práce.

Teoretická část této práce se bude zabývat rozdělením tváření, teorií ohýbání, teorií odpružení a její následnou eliminací, anizotropií mechanických vlastností a statickou zkouškou tahem pro získání hlavních parametrů pro tváření a odpružení.

Experimentální část se bude zabývat vlivu mechanických vlastností na požadovaný rozměr výrobku a zda odpružení materiálu je hlavní příčinou odchylek ve výrobě.



2. Teoretická část

2.1 Tváření kovů [1], [2], [3]

Tváření kovů patří k nejproduktivnějším oborům strojírenské technologie. Tato metoda je velmi produktivní a hospodárná. Tato technologie patří spolu se slévárnictvím k nejstarším technologiím, stále se však modernizuje. Dají se jí vyrábět výrobky, které by se žádnou jinou technologií nedaly vyrobit.

Hlavní výhody :

- produktivita práce
- vysoký koeficient využití materiálu
- vysoká rozměrová a tvarová přesnost

Hlavní nevýhody :

- vysoké pořizovací náklady na stroj
- vysoké pořizovací náklady na nástroj
- omezené rozměry konečného výrobku

Tváření je výrobní proces, při kterém dochází k požadované změně tvaru výrobku nebo polotovaru v důsledku působení vnějších sil, bez odběru třísek. Při tváření dochází k přemísťování částic materiálu v důsledku pohybu dislokací. Proces probíhá v tuhém stavu. Tváření je mechanické zpracování kovů, při kterém nedochází k porušení celistvosti (kromě technologie plošného tváření – stříhání).

Podstatou tváření je vznik plastických deformací požadované velikosti a směru. K počátku trvalé deformace dojde v okamžiku dosažení napětí na mezi kluzu R_e pro daný tvářený materiál. Oblast tváření se většinou pohybuje od meze kluzu R_e až do meze pevnosti R_m . Napětí dle teorie nesmí překročit mez pevnosti R_m , jinak by mohlo dojít k porušení celistvosti, ale např. u hlubokotažných materiálů se pracuje až za mezí pevnosti R_m . Změna tvaru a rozměrů je prováděna přemísťováním částic kovu v jeho tuhém stavu, kdy se předpokládá, že během velkých plastických (trvalých) deformací se objem výchozího tělesa nemění. Zákon zachování objemu platí až do meze pevnosti R_m .

Technologická vlastnost při tváření se nazývá tvárnost, či tvářitelnost. **Tvařitelnost** kovů a slitin je schopnost, trvale měnit tvar bez porušení tvářeného tělesa za konkrétních technologických podmínek (vlastnosti materiálu, nástroje, prostředí, teploty a mechanického zatížení), které umožňují vyrobit součást s požadovanými rozměry a vlastnostmi, a jsou tedy ovlivněny deformačním odporem.



Deformační odpor je napětí, které je v materiálu vyvoláno působením vnějších sil a po překročení meze kluzu R_e dochází k přetvoření materiálu, tedy k plastickým deformacím.

2.1.1 Rozdělení tvářecích procesů dle teplot

Technologie tváření je dělena z různých hledisek. Nejdůležitější hledisko je podle teploty, tzv. tváření za studena, za tepla a za poloohřevu. Je to podle vztahu tvářeného materiálu k teplotě rekrytalizace (což je přibližně 0,4 teploty tání kovu).

2.1.1.1 Tváření za studena (tváření pod rekrytalizační teplotou, kdy teplota tváření je menší než hodnota 0,3 teploty tání tvářeného materiálu, viz obr. 2.1)

- dochází k vyčerpání plastičnosti materiálu, dochází ke zpevňování (zvyšuje se mez kluzu, mez pevnosti i tvrdost), ale výrazně klesá tažnost. Zrna se deformují ve směru tváření, vytváří se textura, dochází k anizotropii mechanických vlastností. Dochází i ke změnám fyzikálních (elektrických a magnetických) vlastností.

Výhody:

- vysoká přesnost rozměrů
- kvalitní povrch, nedochází k okujím (k oxidačním vrstvám)
- zlepšování vlastností zpevnění

Nevýhody:

- použití velkých tvářecích sil
- nerovnoměrné zpevnění
- omezená tvárnost materiálu (lze ji obnovit, tepelným zpracováním, rekrytalizačním žíháním)

2.1.1.2 Tváření za tepla (tváření nad rekrytalizační teplotou, kdy teplota tváření je nad 0,7 teploty tání tvářeného materiálu, viz obr. 2.1)

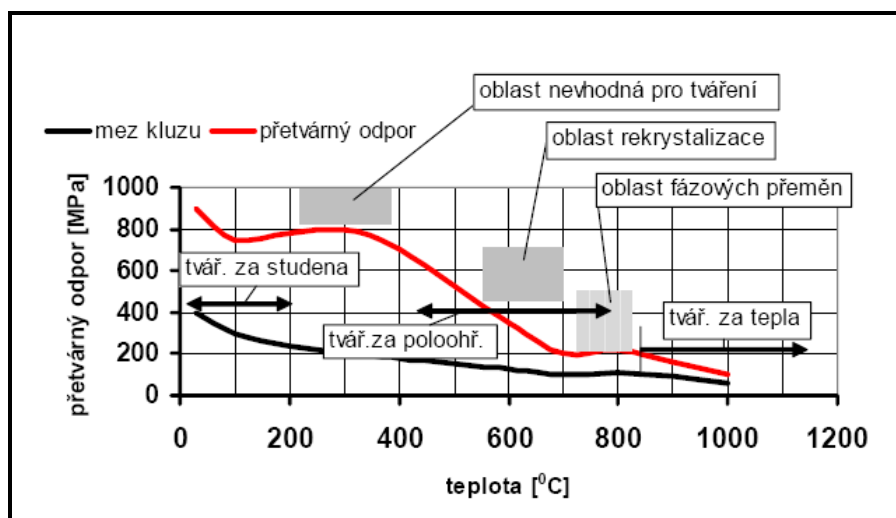
- při této teplotě je rychlost rekrytalizace tak vysoká, že odpevňovací pochody eliminují zpevnění. Materiál se nezpevňuje. Kov si během tváření zachovává svoje plastické vlastnosti, čímž je možné dosáhnout velkého přetvoření. Při tomto druhu tváření vzniká vláknitá textura z hrubé dendritické struktury ingotu, vlákna kopírují tvar výkovku. Nelze ji odstranit tepelným zpracováním, ani tvářením. Způsobuje anizotropii mechanických vlastností.

Výhody:

- použití podstatně nižších tvářecích sil (až 10x menší než u tváření za studena)
- kov si ponechává svoje plastické vlastnosti
- dochází k odstranění trhlin a bublin

- Nevýhody:**
- dochází k okujení, ztráty nepoužitelného materiálu
 - menší tvarová a rozměrová přesnost
 - proces je zdlouhavý

2.1.1.3 Tváření za poloohřevu představuje kompromis mezi tvářením za studena a za tepla, viz obr 2.1. Probíhá od teplot těsně pod rekrytalizační oblastí. Důvod je zlepšení přetvárných vlastností vzhledem k tváření za studena.



Obr. 2.1: Závislost mechanických vlastností ocelí na teplotě: reálné průběhy závislosti meze kluzu a přetvárného odporu jsou ovlivněny druhem oceli. Vyznačené oblasti tváření a velikost přetvárného odporu se mění i podle rychlosti a velikosti tváření /1/

2.1.2 Rozdělení tvářecích procesů dle působení vnějších sil

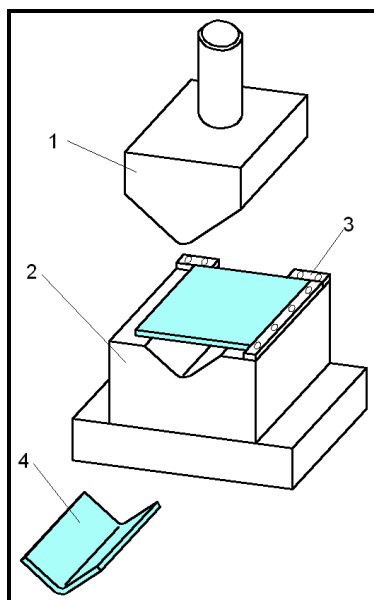
2.1.2.1 Tváření objemové, deformace nastává ve směru všech tří os souřadného systému a patří sem válcování, kování, protlačování, tažení drátů. Tváření za tepla i za studena.

2.1.2.2 Tváření plošné, při kterém převládají deformace ve dvou směrech. Patří sem tažení, rovnání, ohýbání, stříhání, apod. Tyto operace se provádějí spíše za studena.

Pro potřeby této bakalářské práce je významná technologie plošného tváření – ohýbání

2.2 Teorie plošného tváření - ohýbání [1], [2], [4], [5], [6]

Ohýbání je pochod tváření, při kterém je materiál trvale deformován do různého úhlu ohybu s menším nebo větším zaoblením hran. Nástrojem je ohýbadlo, které se skládá z ohybníku a ohybnice, popř. se základacími dorazy, pro snadné a správné založení ohýbaného materiálu, viz obr 2.2. Výrobkem je výlisek, který se nazývá také ohybek. Charakterem ohýbání patří do plošného tváření. Ohýbání je pružně plastická deformace, která má různý průběh od povrchu materiálu k tzv. neutrální ose. Při ohybu jsou napětí v krajních vláknech materiálu největší a zároveň opačného smyslu (tah, tlak) a dosahují obecně hodnot smluvní meze kluzu R_e až smluvní meze pevnosti R_m , tj. oblasti trvalé deformace a také oblast tváření.



Obr. 2.2: Jednoduchý ohýbací nástroj /2/

1 – ohybník, 2 – ohybnice, 3 – základací dorazy, 4 – ohýbaný výlisek

2.2.1 Charakteristika a základní rozdělení ohýbání

Charakteristickým znakem ohýbání je změna tvaru osy ohýbané součásti. Trvalé změny křivosti (různé úhly ohybu) součástí z plechu, tyčí a drátů se provádí ohýbáním. Ohybem se zmenšuje poloměr zakřivení. Obecně je možné až na hranici mezní hodnoty přetvoření za studena R_m (smluvní mez pevnosti). Opak ohýbání je rovnání, kde poloměr křivosti se zvětšuje.

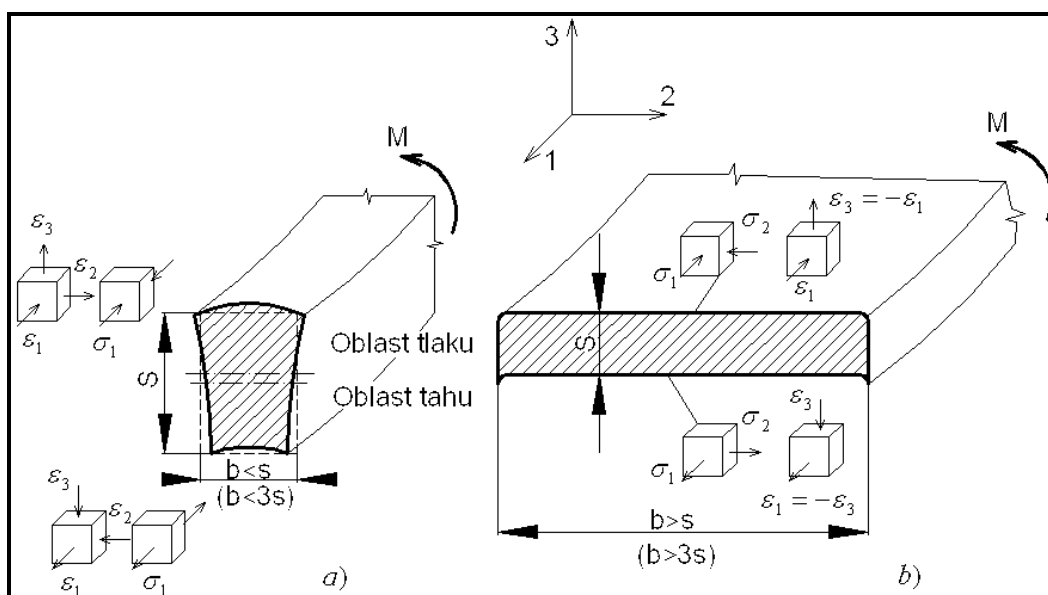
Z hlediska působení na výchozí materiál je možné rozlišení, na ohyb vnějšími momenty, ohyb s lokálními silami a ohyb s kombinací vnějších zatížení, např. ohýbání a tažení, ohýbání a stlačování apod.

Hlavní rozdíl od objemového tváření u ohýbání jsou tahová napětí, která samozřejmě musí být menší než pevnost v tahu ohýbaného materiálu. Při ohybu dochází k deformaci průřezu. Tyto průřezy dělíme do dvou hlavních skupin.

Tzv. vyšší průřezy (např. úzké tyče kdy $b \leq 3s$), které jsou více deformovány než průřezy nižší tzv. široké pásy ($b \geq 3s$). Viz obr. 2.3.

- při ohybu úzkých tyčí obdélníkového průřezu, viz obr. 2.3 a), kde šířka b je menší než tloušťka s je napětí σ_2 ve směru šířky možno zanedbat. Napjatost v krajních vláknech na vnější straně odpovídá jednoosému tahu a na vnitřní straně jednoosému tlaku s trojosým stavem přetvoření. Z toho vyplývá, že šířka ohýbané úzké tyče se na vnitřní, tedy tlakové straně zvětšuje, naopak na vnější tahové straně zmenšuje. Mezi deformovanými vrstvami je neutrální osa, v ní je nulové napětí, v této oblasti se dále nachází vrstva (plocha) nulové deformace, která se při ohýbání neprodlouží ani nezkrátí. Původní osa, neboli osová vrstva ohýbaného materiálu není totožná s neutrální osou, která se posouvá směrem k tlakovým vrstvám. V okolí neutrální osy se nachází pásmo pružné deformace, která má za příčinu nepříznivý vliv odpružení. Neutrální osa se vyskytuje ve všech ohybech.

- při ohýbání širokých pásů, obr. 2.3 b), nedochází k deformaci, v příčném směru, protože přetvoření ε_2 lze vzhledem k jeho velikosti zanedbat a vzniká rovinný stav přetvoření a v krajních vrstvách rovinná napjatost.



Obr. 2.3: Schéma napjatosti a deformace při prostém ohybu tyčí a širokých pásů /4/

2.2.1.1 Rozdělení dle způsobu pohybu nástroje vzhledem k tvářenému materiálu

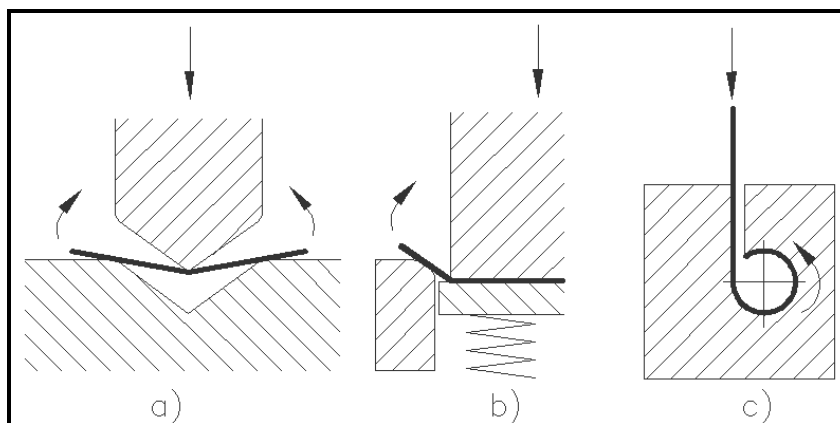
- ohýbání na lisech:

Materiál je tvářen pomocí nástroje, který je nazýván ohýbadlo (skládá se z ohybníku a ohybnice). Pohyblivá část (ohybník) koná přímočaré vratné pohyby. Tento způsob ohýbání se dělá na mechanických, či hydraulických lisech, nebo na speciálních strojích. Nástroj (ohýbadlo) pro použití na lis se v porovnání s ostatními nástroji stavějí dosti jednoduché, často nemají vlastní vedení. Tato metoda má mnoho způsobů.

a) ohýbáním, kdy směr pohybu pohyblivé části (ohybníku) je přibližně shodný se směrem osy úhlu tvořeného rameny ohnutého předmětu. Viz obr. 2.4. a)

b) lemováním, kdy směr pohybu pohyblivé části je totožný se směrem ohnutého ramena. Viz obr. 2.4. b).

c) zakružováním, kdy na tvářený materiál je vyvíjen tlak vyvolávající posouvání plechu po zakřiveném povrchu pevné části. Viz obr. 2.4. c).



Obr. 2.4: Způsoby ohýbání na lisech /2/

- ohýbání ve válcích:

Nástroje jsou válce, které konají otáčivý pohyb. Při této metodě se rozeznává dle polohy roviny ohybu, vzhledem k ose válců.

1) Válcování příčné, kdy rovina ohýbání je kolmá k ose válců. Viz obr 2.5 a), b), c).

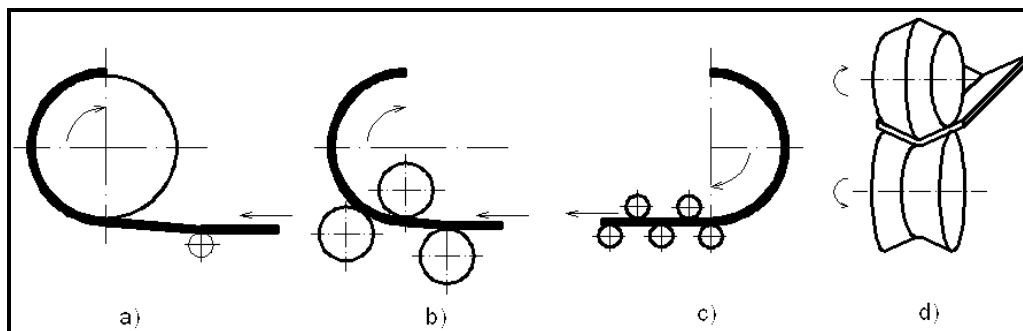
a) navíjení, tvářený materiál přiléhá stále větší délkou k válci a získává jeho profil (použití při stáčení plechů do svitků)

b) zakružování pomocí tří válců

c) rovnání pomocí válců



2) Válcování podélné, kdy rovina ohýbání prochází osami dvou válců s příslušným profilem. Viz obr. 2.5 d)

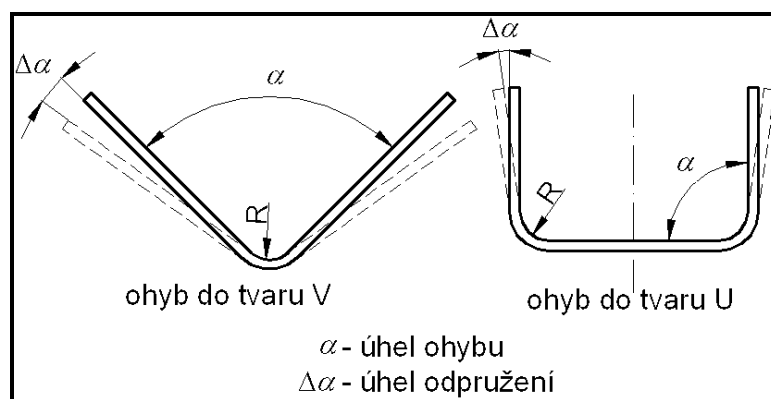


Obr. 2.5: Způsoby ohýbání válcováním /1/

2.2.1.2. Rozdělení dle tvaru ohybu, viz. obr 2.6

a) ohýbání do tvaru „U“

b) ohýbání do tvaru „V“



Obr. 2.6: Rozdělení tvaru ohybu V a U a jejich odpružení /2/

2.2.1.3 Rozdělení dle velikosti poloměru zakřivení

a) ohyb s malým poloměrem za vzniku velké plastické deformace

b) ohyb s velkým poloměrem zakřivení při poměrně malém stupni plastické deformace

2.2.2 Neutrální osa

V místě ohybu se vyskytují tři oblasti ohýbaného materiálu.

1. je vnější oblast trvalého prodloužení. (tah)
2. je vnitřní oblast trvalého napěchování. (tlak)
3. je oblast pružné deformace.

Při ohybu jsou napětí v krajních vláknech materiálu opačného smyslu (tah, tlak) a dosahují hodnot trvalé deformace materiálu.

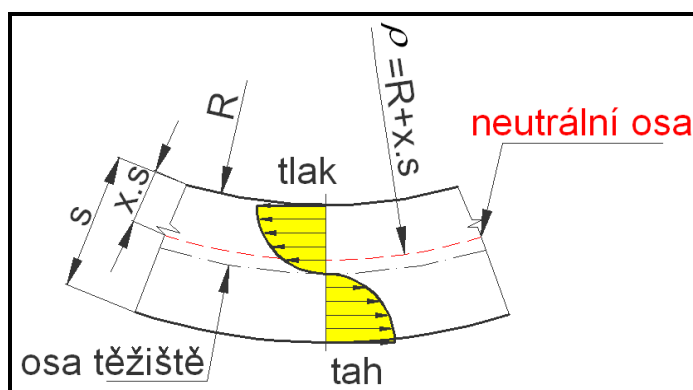
To jsou napětí od meze kluzu R_e až do meze pevnosti R_m . Při ohybu jsou v průřezu úzké tyče více deformovány, než široké pásy.

Kolem střední oblasti průřezu ohýbaného materiálu jsou tahová napětí malá a dosahují hodnot nižších, než je mez kluzu R_e daného materiálu, což je oblast pružné deformace. Tato pružná deformace má za příčinu nežádoucí účinek odpružení po odlehčení materiálu. V přechodu mezi 1. a 2. oblastí jsou vlákna bez napětí a bez deformace. Jejich spojnice tvoří tzv. neutrální osu, ve které není napětí a která se při ohýbání ani neprodlouží, ani nezkrátí. Viz obr. 2.7. Proto její polohu je nutné znát k určení nejmenšího poloměru zaoblení a pro stanovení rozměrů polotovaru (výchozí délky).

Neutrální osa se vyskytuje ve všech ohybech, ale u velkých poloměrů zaoblení ($R/s \geq 12$) se předpokládá, že tato osa je totožná s osou plechu a leží tedy přibližně uprostřed tloušťky plechu. U malých poloměrů zaoblení ($R/s \leq 6$), dochází při ohybu ke změně tloušťky v místě ohybu (ke zmenšení), což tato přeměna průřezu má za následek posunutí neutrální osy na stranu, kde vznikají tlaková napětí. Před tvářením je neutrální osa uprostřed průřezu a při ohybu se posouvá k vnitřní straně ohybu. Ve skutečnosti má neutrální osa tvar paraboly, je však nahrazována kruhovým obloukem. Její poloha závisí na tloušťce materiálu s a poloměru ohybu R . Vzdálenost x , která charakterizuje polohu neutrální osy, závisí na poměru R/s , viz tab. 2.1.

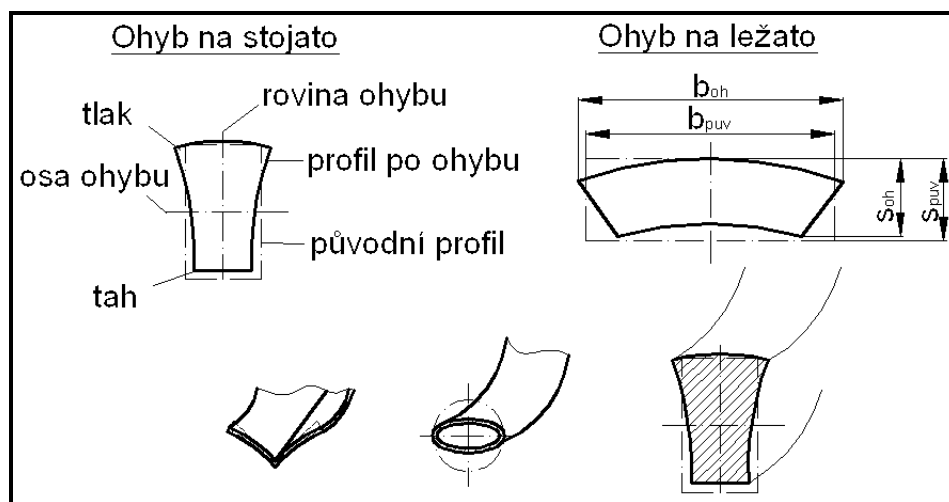
Tab. 2.1: Hodnoty součinitele x , pro určení polohy neutrální osy v závislosti na poloměru ohybu a tloušťce materiálu /2/

$R/s[-]$	0,1	0,3	0,5	0,8	1	1,5	2	4	10	20
$x[-]$	0,23	0,32	0,37	0,40	0,41	0,44	0,45	0,47	0,50	0,50



Obr. 2.7: Schéma posunutí neutrální osy a průběh působícího napětí /2/

Na polohu neutrální osy jsou další experimentální vzorce, které například přihlížejí na vliv ztenčení tloušťky materiálu. Viz obr. 2.8.



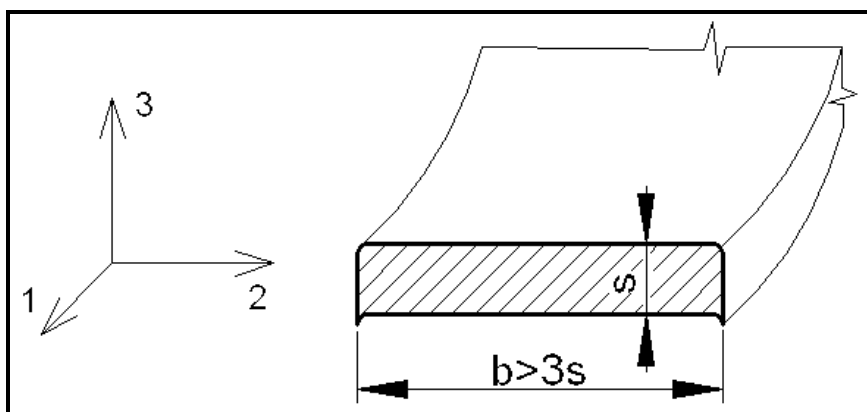
Obr. 2.8 Deformace základních profilů během ohýbání /1/

2.2.3 Výpočet ohybového momentu a průběh při ohýbání tyčí a pásů

K zjednodušené představě průběhu dějů pružných a plastických deformací, bude nejprve zanedbáno zpevnění materiálu a bude předpokládáno, že tělesa jsou z ideálně pružně plastického materiálu a z ideálně plastického materiálu.

Hlavní směry deformace a napjatosti budou označeny dle obr. 2.9.

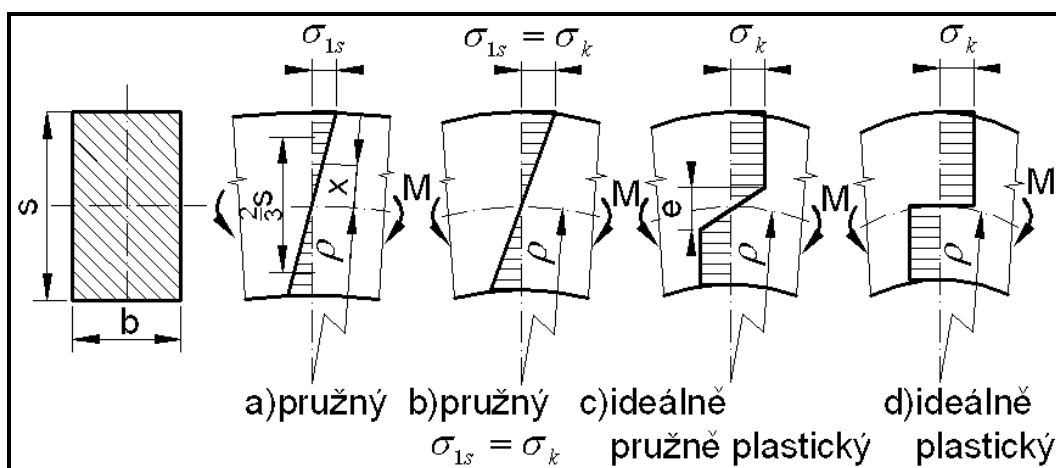
- 1 – směr podélný (osový), rovnoběžný s osou ohýbaného materiálu
- 2 – směr příčný (šířka materiálu), kolmý na osu ohýbaného materiálu a rovnoběžný s povrchovými přímkami válcovaného povrchu ohybu
- 3 – směr radiální, kolmý k vnějšímu i vnitřnímu povrchu ohýbaného materiálu



Obr. 2.9: Označení hlavních směrů

2.2.3.1 Ohýbání úzkých tyčí bez zpevnění

Při ohybu úzkých tyčí obdélníkového průřezu, kde šířka b je značně menší než tloušťka s , lze u těchto ohýbaných materiálů zanedbat napětí působící ve směru šířky materiálu. Předpoklad je, že napjatost odpovídá jednoosému prodloužování (tažení) vláken na vnější straně ohybku a jednoosému stlačování vláken umístěných na vnitřní straně ohybku. Jednotlivé děje jsou rozděleny do čtyř fází průběhu. Viz obr. 2.10.



Obr.2.10: Rozložení napětí ohýbané úzké tyče v jednotlivých fázích ohybu /5/

a) Na počáteční fázi ohýbání nastává pružná deformace. Vztah mezi poměrným prodloužením (přetvořením) ε_1 a napětím σ_1 v průřezu ohýbané tyče je v této fázi lineární a jejich hodnoty ve vrstvě vzdálené o x od osy. Pro tuto fázi platí základní vzorce odvozené z Hookova zákona ($\frac{\sigma}{\varepsilon} = E$). Poloměr ρ označuje zakřivení střední vrstvy v rovině a E je modul pružnosti v tahu.

$$\varepsilon_1 = \frac{x}{\rho} \quad (2.1)$$

$$\sigma_1 = E \frac{x}{\rho} \quad (2.2)$$

Nejvyšší hodnoty napětí σ_1 a poměrného prodloužení (přetvoření) ε_1 v této fázi budou v krajních vláknech průřezu S , které lze určit dosazením do vzorců (2.1) a (2.2) hodnotu $x = \pm \frac{s}{2}$, kde s je tloušťka ohýbaného materiálu.



$$\varepsilon_{1s} = \pm \frac{s}{2 \cdot \rho} \quad (2.3)$$

$$\sigma_{1s} = \pm E \frac{s}{2 \cdot \rho} \quad (2.4)$$

K určení hodnoty vnějšího ohybového momentu M je potřebná ohybové rovnice, do které je dosazeno viz obr. 2.11.

$$\begin{aligned} \sigma_{1s} &= \frac{M}{W} \\ \Rightarrow M &= \frac{1}{2} \cdot \sigma_{1s} \cdot \frac{s}{2} \cdot b \cdot \frac{2}{3} \cdot s \\ M &= \sigma_{1s} \cdot \frac{b \cdot s^2}{6} = E \cdot \frac{s}{2 \cdot \rho} \cdot \frac{b \cdot s^2}{6} \\ M &= E \cdot \frac{b \cdot s^3}{12} \cdot \frac{1}{\rho} \end{aligned} \quad (2.5)$$

$W = \frac{b \cdot s^2}{6}$ je modulem průřezu v ohybu pro obdelníkový průřez

$J = \frac{b \cdot s^3}{12}$ je momentem setrvačnosti průřezu ohýbané tyče vzhledem k neutrální ose.

b) Začátek následující fáze procesu, a to fáze plastických deformací začne, dosažením napětí v krajních vláknech materiálu meze kluzu $\sigma_{1s} = \sigma_k$. Z toho lze vypočítat přibližnou hodnotu zakřivení $\frac{1}{\rho_p}$ a ohybový moment na mezi pružnosti.

$$M_p = \sigma_k \cdot \frac{b \cdot s^2}{6} \quad (2.6)$$

c) Při následném ohybu a růstu ohybového momentu se postupně zvětšuje hloubka (množství) okrajových deformovaných vrstev, zatímco vrstvy okolo středu materiálu jsou stále v pružném stavu. Tloušťku vnitřních nedeformovaných vrstev, lze teoreticky určit z rovnice (2.2) a z požadavku, že $(x = \frac{e}{2})$ a napětí σ_1 na povrchu materiálu se rovnalo napětí na mezi kluzu σ_k .

$$e = 2\rho \cdot \frac{\sigma_k}{E} \quad (2.7)$$



Potom ohybový moment ke středu průřezu bude dán rozdílem dvojic sil.

$$M = \frac{b \cdot s^2}{4} \cdot \sigma_K - \frac{b \cdot e^2}{12} \cdot \sigma_K$$

$$M = \sigma_K \cdot \frac{b \cdot s^2}{4} \left(1 - \frac{e^2}{3 \cdot s^2} \right) \quad (2.8)$$

Po dosazení z (2.7) do (2.8), je dosažen obecný průběh ohybového momentu pro ideálně pružně plastický ohyb úzké tyče.

$$M_{pl} = \frac{b \cdot s^2}{4} \cdot \sigma_K \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \cdot \frac{\rho^2}{s^2} \left(\frac{\sigma_k}{E} \right)^2 \right] \quad (2.9)$$

d) Pokud se plastická oblast rozšíří na celou tloušťku s ohýbané tyče, $e = 0$, ohybový moment dosáhne maximální hodnoty ideálně plastického ohybu.

$$M_{\max} = \frac{b \cdot s^2}{4} \cdot \sigma_K \quad (2.10)$$

Z porovnání vztahů plyne, že maximální moment při ideálně plastickém ohybu je o 50% větší než moment na mezi plastického přetvoření.

2.2.3.2 Ohýbání širokých pásů bez zpevnění

Při ohýbání širokých pásů bez zpevnění je přetvoření ve směru šířky b ztíženo a ve střední části širokých pásů k němu vlastně vůbec nedochází ($\varepsilon_2 = 0$), je to způsobeno velkou šířkou materiálu, který klade odpor deformaci.

Dochází pouze k rovinné deformaci, při níž se změna délky vlákna v podélném směru kompenzuje výhradně změnou tloušťky v radiálním směru. Ze zákona zachování objemu, který při tváření platí to meze pevnosti, platí $\varepsilon_1 = -\varepsilon_3$. Pro

ohýbání širokých pásů se mezní hodnoty ohybových momentů M_p a M_{\max} zvětšují

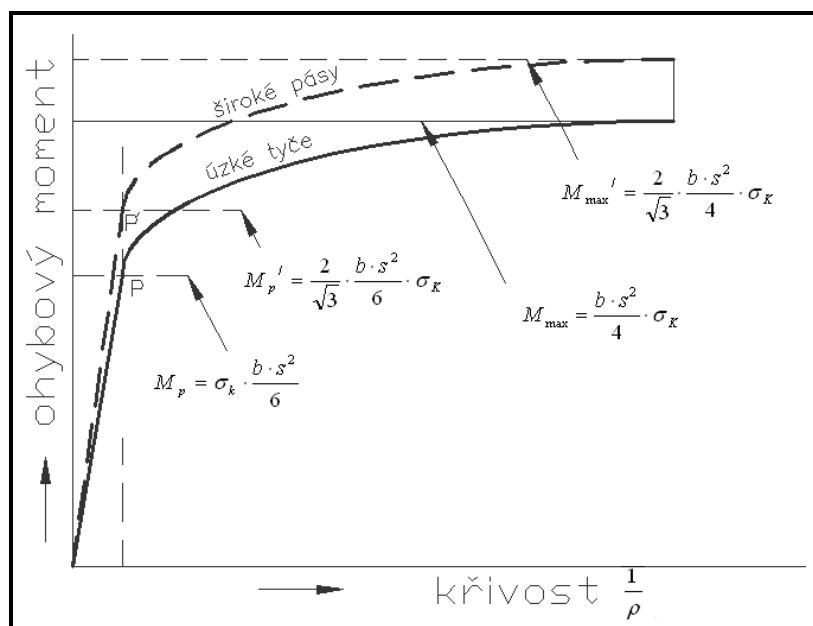
o hodnotu $\frac{2}{\sqrt{3}}$ oproti momentům u úzkých tyčí. Tyto momenty se označují

M_p' a M_{\max}' .

$$M_p' = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{b \cdot s^2}{6} \cdot \sigma_K \quad (2.11)$$

$$M_{\max}' = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{b \cdot s^2}{4} \cdot \sigma_K \quad (2.12)$$

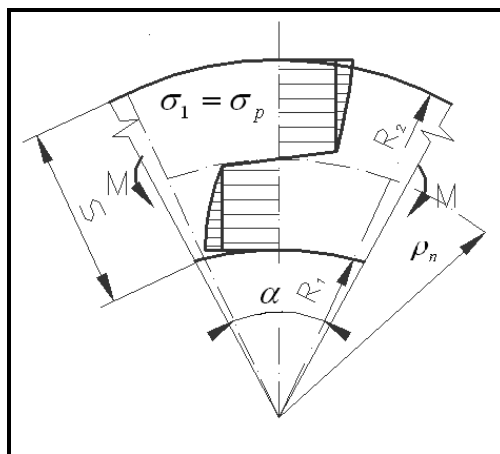
Tyto ohybové momenty pro široké pásy z ideálně pružně plastických materiálů jsou znázorněny a porovnány z úzkými tyčemi při závislosti ohybového momentu a křivosti viz obr. 2.11.



Obr. 2.11: Diagram závislosti ohybového momentu na křivosti /4/

2.2.3.3 Ohýbání se zpevněním

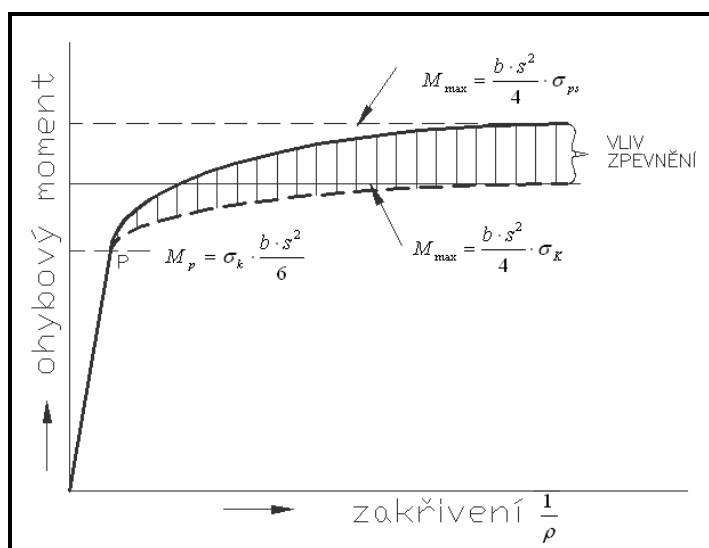
Při ohýbání bez zpevnění bylo uvažováno těleso z ideálně pružně plastického a z ideálně plastického materiálu bez zpevnění s konstantní mezí kluzu. Ve skutečnosti u materiálů tvářených za studena, vzrůstá mez kluzu v závislosti na stupni plastické deformace a dochází ke zpevnění. Proto se zvětšuje i napětí σ_1 , kde tento nárůst je největší v krajních vláknech na povrchu. Tyto vlákna jsou nejvíce deformována viz obr. 2.12.



Obr. 2.12: Vliv zpevnění na rozložení tečného napětí /4/

Po vyčerpání plastické deformace, ale dojde k porušení celistvosti. Obecně musí tedy být dodržena podmínka $\sigma_{\text{imax}} \leq \sigma_p$. Přírůstku napětí odpovídá vzrůst ohybového momentu. Ten roste více, čím větší je plastická deformace materiálu a tedy čím menší je poloměr zakřivení viz obr. 2.13. Například pro ohyb úzké tyče bude platit.

$$M_{\text{max}} \cong \frac{b \cdot s^2}{4} \cdot \sigma_p \quad (2.13)$$



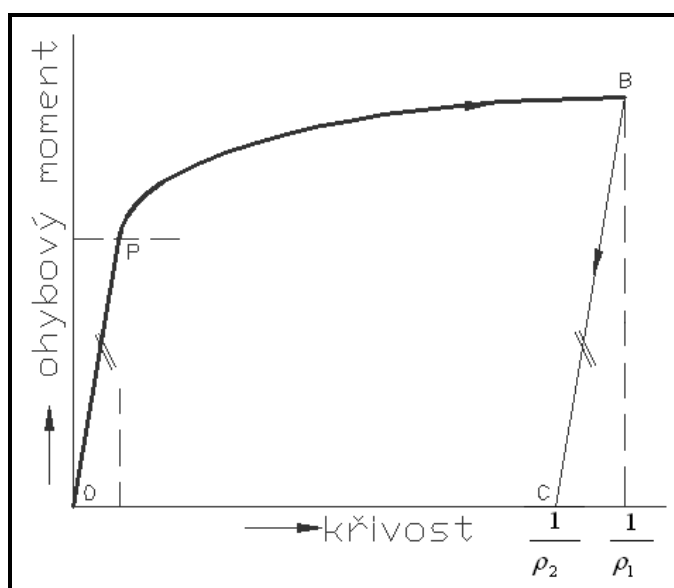
Obr. 2.13: Závislost ohybového momentu na zpevnění tyče /4/

2.2.4 Odpružení při ohybu

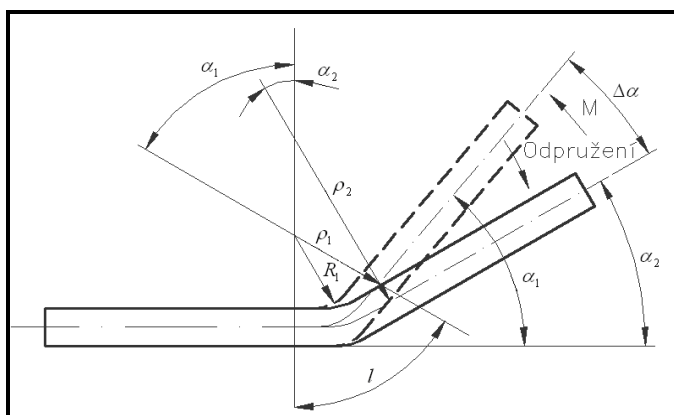
Ohyb za studena doprovází trvalé plastické deformace, ale i pružné deformace. Kolem střední oblasti průřezu ohýbaného materiálu jsou tahová napětí malá a dosahují hodnot nižších, než je mez kluzu R_e daného materiálu, což je oblast pružné deformace. Tato pružná deformace má za příčinu nežádoucí děj odpružení po odlehčení materiálu. Výsledný tvar ohnuté součásti po odpružení nesouhlasí s tvarem ohýbadla. Proto při konstrukci ohýbacích nástrojů je třeba na odpružení brát velký zřetel a tento problém řešit v rozborové části, jinak bude docházet ke zbytečným ekonomickým ztrátám.

Na obr. 2.14 je znázorněna závislost mezi ohybovým momentem M a zakřivením $\frac{1}{\rho}$, která se vztahuje pouze na případ, kdy ohybový moment vzrůstá a dosahuje moment i ohyb maximální hodnoty. Pokud se hodnota ohybového momentu začne zmenšovat, dojde k odlehčení.

Při tomto ději nedochází k další plastické deformaci, ale nastává zpětná pružná deformace – odpružení, viz obr 2.15. Po ohybu součásti momentem M o úhel α_1 na křivost $\frac{1}{\rho_1}$ a po následném odlehčení ohybového momentu na nulu, dojde k odpružení na úhel α_2 . Také dojde ke změně dosažené křivosti na konečnou hodnotu $\frac{1}{\rho_2}$. Rozdíl těchto křivostí je křivost tzv. pružná (vratná) a vznikne podle teorie mechaniky pružnosti a pevnosti ohybovým momentem M při ohybové tuhosti k danému profilu $E \cdot J$.



Obr. 2.14: Závislost ohybového momentu na křivosti s vlivem odpružení /4/



Obr. 2.15: Schéma odpružení po ohybu /4/

**2.2.4.1 Odpružená křivost pro úzké tyče**

$$\begin{aligned}
\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} &= \frac{M}{E \cdot J} \\
\rightarrow M &= \sigma_{1p} \cdot \frac{b \cdot s^2}{6} \\
\rightarrow J &= \frac{b \cdot s^3}{12} \\
\Rightarrow \frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} &= \frac{2 \cdot \sigma_{1p}}{s \cdot E}
\end{aligned} \tag{2.14}$$

Kde ohybové napětí v krajních vláknech σ_{1p} je definováno pomocí průřezovým modulem v ohybu W , tedy dle ohybové rovnice

$$\sigma_{1p} = \frac{M}{W} \tag{2.15}$$

2.2.4.2 Odpružená křivost pro široké pásy

$$\begin{aligned}
\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} &= \frac{M}{E \cdot J} \cdot (1 - \mu^2) = \frac{2 \cdot \sigma_{1p}}{s \cdot E} \cdot (1 - \mu^2) \\
\rightarrow M &= \sigma_{1p} \cdot \frac{b \cdot s^2}{6} \cdot (1 - \mu^2) \\
\rightarrow J &= \frac{b \cdot s^3}{12}
\end{aligned} \tag{2.16}$$

2.2.4.3 Výpočet úhlového odpružení

Lze vyjádřit poloměry ρ_1 a ρ_2 v předešlých rovnic pro úzké tyče a široké pásy, pomocí úhlů v obloukové míře α_1, α_2 a délky středního oblouku l , která se nemění, protože odpružení je způsobeno pružnou deformací.

$$\alpha_1 \cdot \rho_1 = \alpha_2 \cdot \rho_2 = l \tag{2.17}$$

Po dosazení do rovnic

Pro úzké tyče: $\Delta\alpha = \frac{M \cdot l}{E \cdot J} = \frac{2 \cdot \sigma_{1p}}{s \cdot E}$ (2.18)

Pro široké pásy : $\Delta\alpha = \frac{M \cdot l}{E \cdot J} \cdot (1 - \mu^2) = \frac{2 \cdot \sigma_{1p}}{s \cdot E} \cdot (1 - \mu^2)$ (2.19)

Pro praktický výpočet odpružení je celá řada empirických vztahů a grafů.

2.2.4.4 Hlavní vlivy na děj odpružení

- mechanické vlastnosti materiálu
- poloměr ohybu
- tloušťka ohýbaného materiálu
- tvarem součásti
- použití kalibrace
- konstrukcí ohybadla

2.2.5 Eliminace odpružení při ohybu

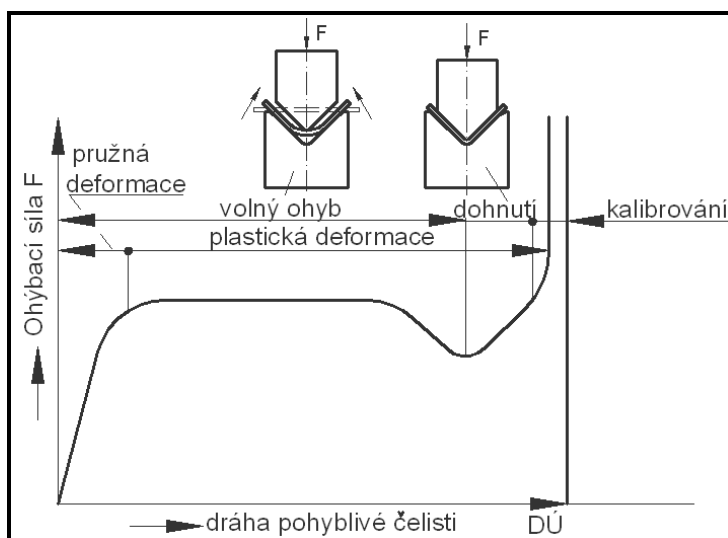
Je to snaha zabránění odpružení, tzv. projevu zpětné pružné deformace, aby byla dosažena požadovaná tvarová a rozměrová přesnost ohybku. Je celá řada způsobů jak tento děj eliminovat.

Např.:

1. Ohybek se ohne o něco více, ale tento způsob není vhodný pro hromadnou výrobu, jelikož materiál např. ocel, která spadá do určité třídy není a nebude nikdy stejná, protože jednotlivé prvky, aby splňovali tuto třídu oceli, jsou v určité toleranci. Proto tento způsob není pro sériovou a hromadnou výrobu vhodný.

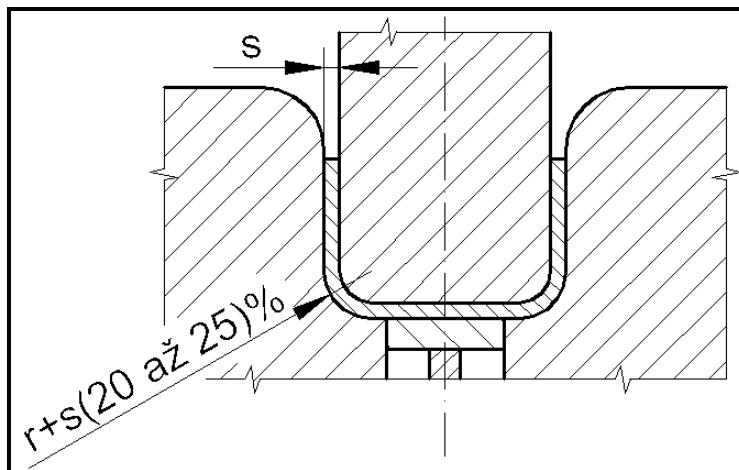
2. Fáze dolisování, která se provádí fázi volného ohýbání, tento způsob je spojen s prudkým nárůstem síly. Viz obr. 2.16.

Materiál se lisuje mezi pracovními plochami ohybadla. Toto dolisování se nazývá **kalibrace**. Kalibrovací tlak se volí experimentálně v praxi, podle možnosti stroje a požadavku na výlisek. Kalibrace není úplnou eliminací odpružení, ale podstatně tento děj snižuje.



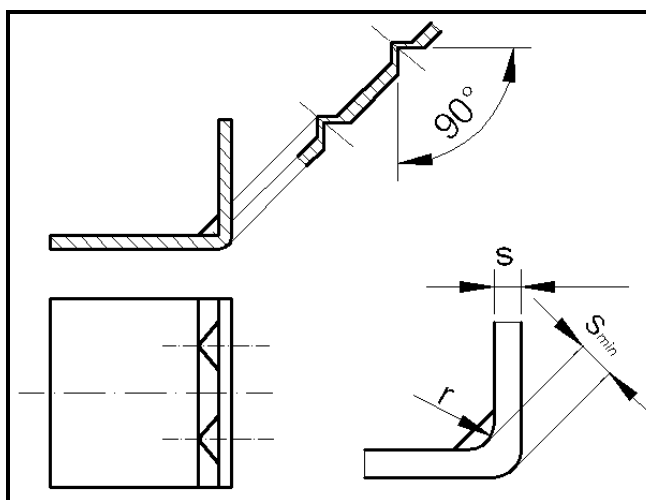
Obr. 2.16: Průběh ohýbací síly včetně kalibrace /1/

3. Další způsob je místní plastické přetvoření v místě ohybu. Tzv. plastická deformace, způsobena deformací rádiusu pomocí upravené ohybnice. Viz. obr. 2.17. Dochází ke zpevnění a snižuje se tak odpružení.



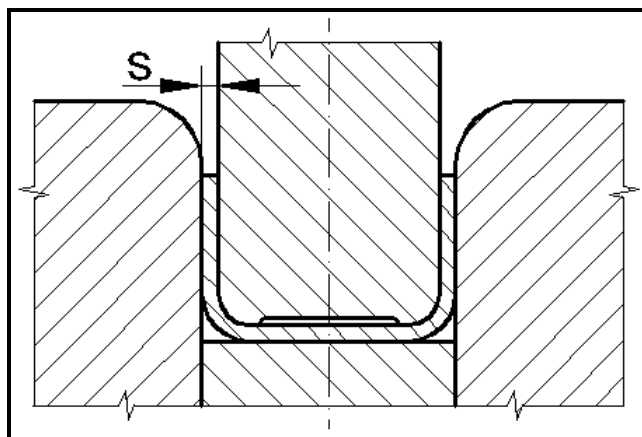
Obr. 2.17: Zpevnění materiálu deformačním poloměrem /1/, /6/

4. Pomocí tzv. prolisu, tvarové vyztužení v místě ohybu, např. vytvoření žeber ve směru kolmém k ohybu. Tento způsob, ale mění tvar výlisku. Musí se zhodnotit, jestli prolis, nebude překážet. Viz obr. 2.18.



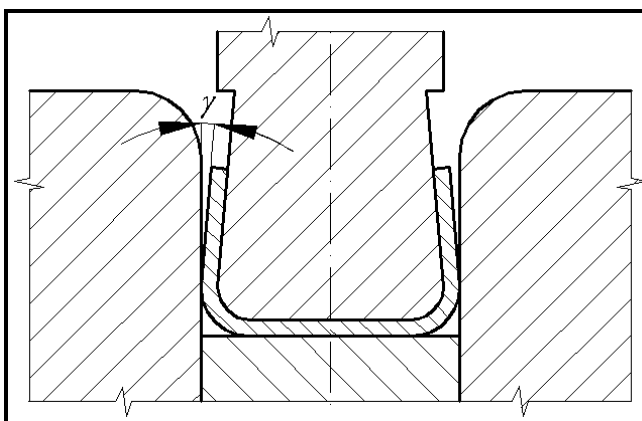
Obr. 2.18: Vylisování vyztužujícího žebra v místě ohybu /1/, /6/

5. Pomocí tzv. razící hrany, je to úprava ohybníku, tento způsob je vhodný pro tenké materiály, zpevnění díky razící hraně. Viz obr. 2.19.



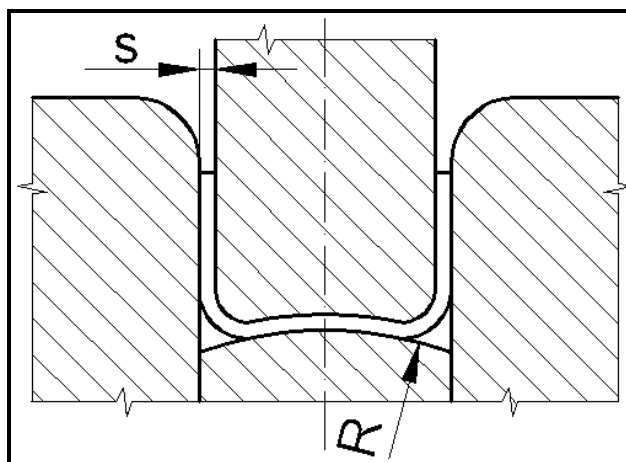
Obr. 2.19: Zpevnění pomocí razící hrany /1/, /6/

6. Pomocí podbroušení ohybníku viz. obr. 2.20.



Obr. 2.20: Podbroušení pohyblivé čelisti /1/, /6/

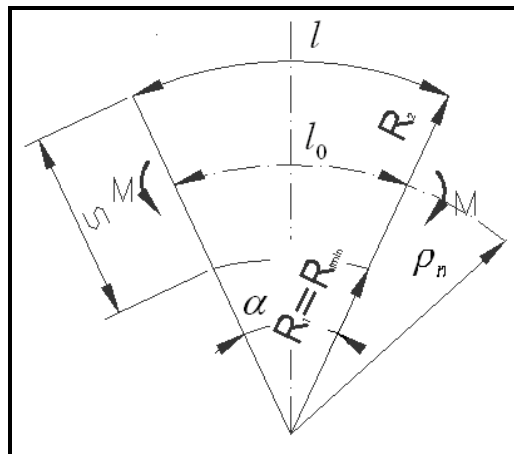
7. Pružné deformace dna viz. obr. 2.21, pomocí úpravy ohybníku a ohybnice. Pružná deformace nastává nejprve u dna, napětí musí splňovat podmínku pružné deformace. Vhodné pro pružné materiály.



Obr. 2.21: Zaoblením spodní části obybníku /1/, /6/

2.2.6 Minimální a maximální poloměr ohybu

a) Ve skutečnosti je ohyb pružně plastický a je možný až do minimálního poloměru ohybu R_{lmin} . Kdy poté dojde k porušení na vnější tahové straně, protože napětí v krajních vláknech dosáhne meze pevnosti v tahu R_m . Podle schématu na obr. 2.22 napětí v krajních vláknech způsobí poměrné přetvoření.



Obr. 2.22: Deformační schéma elementu při ohybu /4/

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{R_2 \cdot \alpha - \rho_n \cdot \alpha}{\rho_n \cdot \alpha} = \frac{(R_1 + s) \cdot \alpha - \left(R_1 + \frac{s}{2}\right) \cdot \alpha}{\left(R_1 + \frac{s}{2}\right) \cdot \alpha} = \frac{s}{2 \cdot R_1 + s}$$

$$\varepsilon_{1max} = \frac{s}{2 \cdot R_{lmin} + s} \quad (2.20)$$

$$\Rightarrow R_{lmin} = \frac{s}{2} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_{1max}} - 1 \right) = C \cdot s$$

C - koeficient který lze zjistit pomocí odborné literatury pro určité materiály

R_{lmin} - minimální poloměr ohybu vnitřní stěny.

b) Maximální poloměr ohybu je, když v krajních vláknech dojde právě k trvalé deformaci a to je v okamžiku kdy napětí dosáhne meze kluzu daného ohýbaného materiálu.

Při tomto výpočtu bude se vycházet z Hookova zákona a rovnice (2.20).

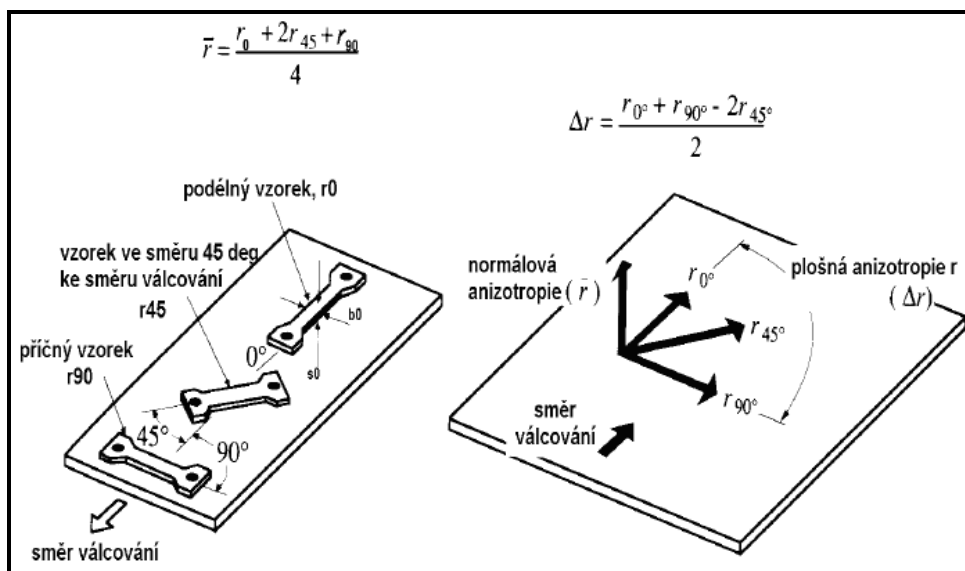
$$\varepsilon_{1min} = \frac{\sigma_k}{E} = \frac{s}{2 \cdot R_{lmax} + s}$$

$$\Rightarrow R_{lmax} = \frac{s}{2} \cdot \left(\frac{E}{\sigma_K} - 1 \right) \quad (2.21)$$

R_{lmax} - maximální poloměr ohybu vnitřní stěny.

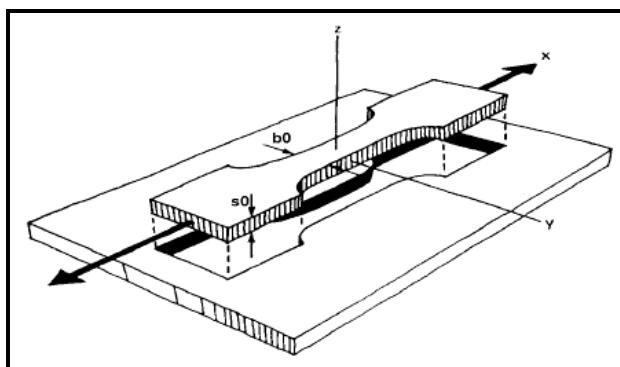
2.3 Anizotropie [7], [8]

Její definice je nestejnoměrnost vlastností v různých směrech souřadného systému. Osa x je totožná se směrem válcování, tento směr se v praxi označuje jako směr 0° . Viz obr. 2.23. a 2.24.



Obr 2.23: Schéma zvolení souřadného systému [7/]

Při posuzování anizotropie plechů se rozpoznává anizotropie plošná (v rovině plechu) a anizotropie normálová (ve směru tloušťky).



Obr. 2.24: Souřadný systém na normalizované tyčce pro statickou zkoušku tahem [7/]

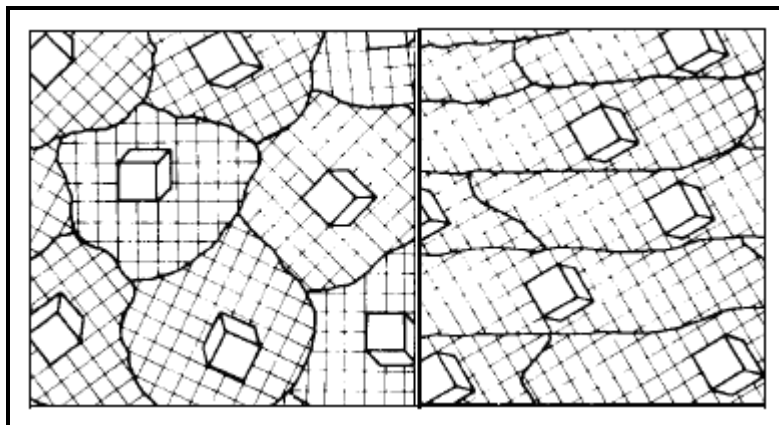
Rozhodující vliv na anizotropii má textura. Textura je výsledkem tváření, ale lze ji podstatně ovlivnit už při lití polotovaru (ingotu).

Vláknitá textura je způsobena především nehomogenitou chemického složení a přítomností vměstků v litém polotovaru.

Řádkovitá textura vzniká uspořádáním strukturních fází, při tváření ocelí s vícefázovou strukturou. Tvoří se tzv. řádky např. feritu a perlitu.

Deformační textura strukturální při tváření za studena, dochází i ke zpevnění, může vzniknout u všech materiálu.

Deformační krystalografická textura vzniká, při tváření nebo tepelném zpracování, uspořádáním původně náhodně orientovaných jednotlivých zrn do jisté přednostní orientace. Viz obr. 2.25 Záměrně je vyvolána především u plechů, orientací se zvyšuje pevnost, materiál je odolný proti ztenčování.



Obr. 2.25: Záměrně vyvolaná orientace zrn /7/

2.4 Základní vlastnosti kovů a jejich zkoušení [9], [10]

Kovy jsou hojně průmyslově využívány pro svoje dobré vlastnosti, které závisí na chemickém složení, struktuře, druhu a způsobu tepelného zpracování. Trend je neustálý vývoj strojírenských materiálů. Aby byla zaručena správnost a hospodárnost těchto materiálů, musí být zaručena znalost jejich vlastností, které je nutno co nejpřesněji zjišťovat.

2.4.1 Základní dělení vlastností kovů

Fyzikální: Jsou velmi rozmanité, patří sem zejména měrná hmotnost ρ , teplota tání T , délková roztažnost α , tepelná vodivost λ , atd.

Chemické: Charakterizují chování materiálu vlivem působení chemických účinků, kdy dochází k porušování, nebo rozrušení celé součásti. Např. odolnost proti korozi, odolnost proti oxidaci za vyšších teplot tzv. žáruvzdornost, atd.

Mechanické: Při zpracování i při použití jsou materiály vystaveny různému namáhání, jako je tah, tlak, krut, střih a ohyb. Tato namáhání obvykle nepůsobí samostatně, ale v různých kombinacích.



Materiál je tedy vystaven složenému namáhání. Aby jim materiál mohl odolávat, musí mít určité vlastnosti, jako pevnost, tvrdost, pružnost, houževnatost, atd.

Technologické: Charakterizují chování materiálu při určitém technologickém zpracování. Tyto vlastnosti jsou například tvárnost, obrobiteľnosť, slévateľnosť, svařitelnost, atd.

2.4.2. Základní rozdělení zkoušek kovů

Zjišťování vlastností a vad materiálu. Je rozděleno dle účinku zatížení na zkušební těleso, zda je destruktivní nebo nedestruktivní a dle časového průběhu zatěžující síly na statické a dynamické.

- mechanické zkoušky za přirozených teplot
- mechanické zkoušky za vyšších teplot
- technologické zkoušky, kde výsledek není hodnota, ale jestli daný materiál je vhodný nebo není vhodný pro danou technologii.
- nedestruktivní zkoušky (defektoskopie)

2.4.2.1. Mechanické zkoušky

Slouží k zjišťování mechanických vlastností za normalizovaných podmínek. Výsledkem jsou číselné hodnoty, které jsou potřebné pro návrh jednotlivých součástí. Dělí se podle časového průběhu zatěžující síly a podle účinku na zkušební těleso.

Statické mechanické zkoušky: těleso je zatěžováno silou, která plynule roste až do porušení materiálu. Podle způsobu působení zatěžující síly se rozděluje tyto zkoušky na zkoušky pevnosti v tahu, tlaku, ohybu, krutu a stříhu.

Zkoušky dynamické: zatížení probíhá buď velkou rychlostí tzv. rázové zkoušky, kde výsledkem je vrubová houževnatost, nebo se mnohonásobně cyklicky opakuje tzv. únavové zkoušky, kde výsledkem je mez únavy a časová mez únavy, tyto napětí lze odečíst z Wohlerovi křivky

- statická zkouška tahem EN 10 002-1

Je nejrozšířenější statickou zkouškou. Je nutná u všech technických materiálů, pomocí ní jsou zjišťovány některé základní hodnoty potřebné pro výpočet



konstrukčních prvků a volbu vhodného materiálu. Zkoušky tahem se zpravidla nedělají přímo na vyrobené součásti, ale na zkušebních tyčích, jejichž tvary jsou také normalizovány.

Pro zkoušku v tahu se používají dva základní druhy zkušebních tyčí s kruhovým a obdélníkovým průřezem. Před upnutím zkušební tyče do čelistí (upínací hlavy). Je nutné si vyznačit dle normy rysky na tyčce.

Začne-li na tyčku působit tahová síla, způsobí tato síla v tyčce napětí. Při zvyšující síle, roste toto napětí, které způsobuje deformaci, až do chvíle porušení celistvosti. Podíl síly F a skutečné plochy průřezu S v kterémkoli části zkoušky je nazýván skutečným napětím. Spíše se používá tzv. hodnoty smluvních napětí, protože se neuvažuje změna průřezu tyče a zatížení se vztahuje na původní průřez S_0 .

Tahovou zkouškou, někdy nazývanou trhací lze zjistit:

- **pevnost v tahu** (mez pevnosti v tahu) R_m je smluvní hodnota napětí daného podílem největší zatěžující síly F , kterou snese zkušební tyč, a původního průřezu tyče S_0

$$R_m = \frac{F_{\max}}{S_0} [MPa] \quad (2.22)$$

- **prosté prodloužení**, byla-li původní délka zkušební tyčky l_0 a délka změřená po přetržení l_U , je celkové prodloužení

$$\Delta l = l_U - l_0 [mm] \quad (2.23)$$

- **poměrné prodloužení** ε je dáno poměrem změny délky Δl k původní délce zkušební tyčky l_0

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_U - l_0}{l_0} [-] \quad (2.24)$$

- **tažnost** A_x je poměrné prodloužení vyjádřené v procentech původní délky. Index x, je označení krátké, či dlouhé tyče

$$A_x = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100 = \frac{l_U - l_0}{l_0} \cdot 100 [\%] \quad (2.25)$$

- **kontrakce** (poměrné zúžení) Z je dána poměrem zúžení průřezu tyčky po přetržení k původnímu průřezu tyče S_0 . Je vyjadřována v procentech

$$Z = \frac{S - S_0}{S_0} \cdot 100 [\%] \quad (2.26)$$



- **mez v kluzu** R_e

$$R_e = \frac{F_K}{S_0} [MPa] \quad (2.27)$$

Z tahové zkoušky lze dále zjistit odvozené ukazatele, ke zlepšení rozlišení materiálů.

- **ukazatel hlubokotažnosti**

$$UH = \frac{R_e}{R_m} \quad (2.28)$$

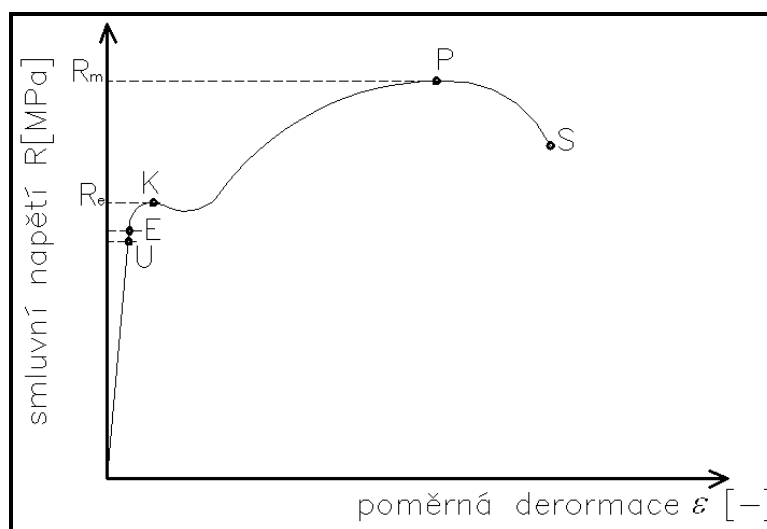
- **komplexní ukazatel tvařitelnosti**

$$KUT = \frac{R_e}{R_m} \cdot A_x \quad (2.29)$$

- **zásoba plasticity**, kde koeficient k je volen dle materiálu.

$$ZP = k \cdot (R_m - R_e) \cdot A_x \quad (2.30)$$

Průběh smluvního diagramu a výraznost meze kluzu se mění dle zkoušeného materiálu. Např. viz obr 2.26.



Obr. 2.26: Smluvní diagram statické zkoušky tahem /2/

Ze smluvního diagramu, lze určit řadu materiálových parametrů.

- **Mez úměrnosti** R_u : odpovídá bodu U na obr. 2.26, je to teoreticky maximální napětí, kde prodloužení je ještě přímo úměrné napětí. Do této meze platí Hookův zákon $R = \varepsilon \cdot E$

E – modul pružnosti v tahu, Youngův modul pružnosti



- **Mez pružnosti** R_p : odpovídá bodu E na obr. 2.26, je to maximální napětí, do které vznikají pouze pružné vratné deformace. Obecně je obtížně zjistitelná, proto je definováno smluvní mez pružnosti $R_{0,005}$, to je napětí, které po odlehčení, vyvolá minimální trvalou deformaci (prodloužení) zkušební tyče 0,005% původní délky l_0 .

- **Mez kluzu** R_e : odpovídá bodu K na obr. 2.26, je to napětí, při němž nastávají podstatné deformace, které někdy dočasně pokračují, ani by se zároveň zvyšovalo napětí. Je to počátek plastické (trvalé deformace). Může být výrazná, nebo naopak, proto se zavádí smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$, to je napětí, které zůstává trvalá deformace tyče 0,2% l_0 .

- **Mez pevnosti** R_m : odpovídá bod P, je to největší smluvní napětí, který materiál vydrží bez porušení, do této meze platí zákon zachování objemu. V tomto okamžiku se začne tvořit zúžení tzv. krček, část energie se spotřebovává na tvorbu krčku.

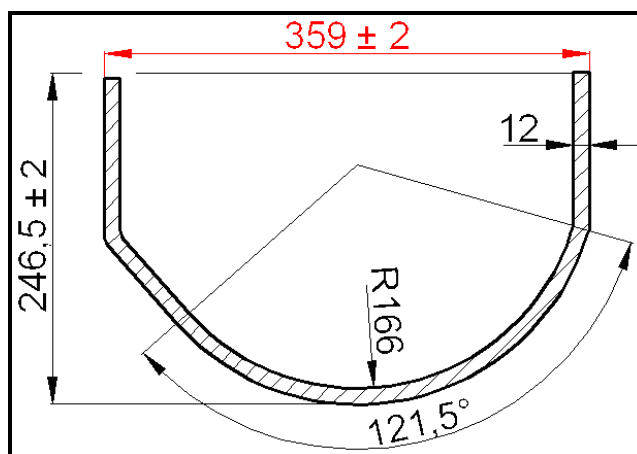
3. Experimentální část

Na základě požadavku firmy Auto Závod Český Dub, spol. s.r.o. je cílem této předkládané bakalářské práce zjistit, proč při výrobě blatníku viz obr. 3.1 pro vysokozdvížný vozík dochází u většiny vyrobených dílů k odchylce požadovaného tolerovaného rozměru rozevření viz. obr. 3.2. Tato práce by měla objasnit zda při výrobě má hlavní vliv na odchylky u rozměru rozevření zpracovávaný materiál nebo konstrukce nástroje. Z naměřených výsledků by mělo být zřejmé zda by bylo vhodné změnit jakost tvářeného materiálu, nebo spíše přikročit ke konstrukční úpravě stávajícího nástroje. Popřípadě doporučení pro výrobu nového nástroje, kde by byla snaha o snížení výrobních operací na minimum.

Tato předkládaná bakalářská práce se bude týkat zjištění vlivu změny mechanických vlastností materiálu na odchylku při výrobě blatníku pro vysokozdvížný vozík a zároveň zhodnocení zda tvářený materiál má hlavní vliv na odchylky při výrobě.



Obr. 3.1: Tvar vyráběného blatníku pro vysokozdvížný vozík



Obr. 3.2: Schéma vyráběného dílu se zkoumaným rozměrem 359 ± 2 [mm]



3.1 Technologický postup výroby blatníku

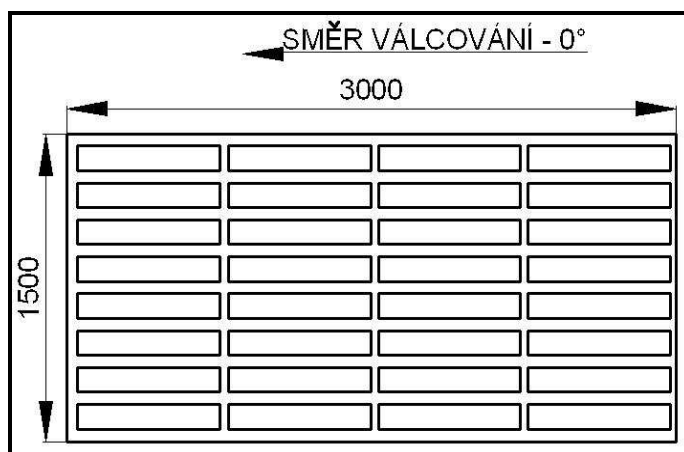
Tento typ blatníku viz obr. 3.1. je vyráběn z tabule plechu o rozměrech 1500x3000 mm z oceli S235JR dle EN 10025-2 tloušťky 12 mm. Dřívější označení ČSN 11 375. Chemické složení a vlastnosti tvářeného materiálu jsou uvedeny viz tab. 3.1.

Tab. 3.1. Chemické složení, základní mechanické a technologické vlastnosti tvářeného materiálu S235JR EN 10025-2

Chemické složení v % hmot.	C_{\max}	Mn_{\max}	Si_{\max}	P_{\max}	S_{\max}	N_{\max}
Pro $s = 12[mm]$	0,19	1,50	-	0,045	0,045	0,014
Mechanické vlastnosti pro zkoušky v podélném směru, pro výrobky jmenovité tloušťky $s = 12[mm]$.	Minimální mez kluzu $R_{p0,2}[MPa]$					
	235					
	Pevnost v tahu $R_m[MPa]$					
	360 až 510					
	Minimální tažnost v % $(L_0 = 5,65 \cdot \sqrt{S_0})$					
	26					
Technologické vlastnosti	Vhodný pro tváření za studena i za tepla, svařitelnost zaručená.					

Postup výroby:

- 1) Řezání plazmou z tabule plechu dle výrobního výkresu viz příloha 1, ve směru válcování plechu viz obr. 3.3, kontrola rozměrů a kvality řezu, 1.kus a každý 10. kus.



Obr. 3.3: Schéma umístění polotovárů při řezání plazmou

- 2) Broušení, čištění od opalů, kontrola čistoty výpalku.
- 3) Tryskání povrchu ve vzduchové tryskací komoře, kontrola kvality tryskání.



- 4) Ohraňení. Předehtnutí konců výpalku viz obr. 3.5 dle výrobního výkresu na ohraňovacím lisu viz obr. 3.4, kontrola rozměrů, 1. kus a každý 5.kus.



Obr. 3.4: Ohraňovací lis



Obr. 3.5: Tvar výpalku po ohraňení

- 5) Ohnutí v ohýbacím nástroji na hydraulickém lisu viz obr. 3.6, kontrola tvaru a rozměrů dle výrobního výkresu, každý kus viz obr. 3.7.



Obr. 3.6: Hydraulický lis s ohýbadlem



Obr. 3.7: Tvar výlisku

- 6) Dorovnání dle potřeby. Rozměr rozevření dle výrobního výkresu většinou neodpovídá skutečnosti. Proto je nutná operace dorovnání na požadovaný rozměr rozevření. Cílem výroby je tuto operaci eliminovat na minimum.

Snaha této bakalářské práce bude zjištění hlavní příčiny rozdílných hodnot odchylek rozměrů při výrobě. Zda na nepřesnost má hlavní vliv odpružení tvářeného materiálu.



3.2 Postup měření

Po ohnutí na hydraulickém lisu dochází k odpružení materiálu, tento nepříznivý vliv je pro technologii ohýbání charakteristický. Odpružení se dá určitými způsoby eliminovat (viz teoretická část). Aby bylo možné zjištění hlavní příčiny zkoumaného problému, byly při výrobě měřeny odchylky požadovaného rozměru.

V průběhu bakalářské práce bylo zkoumáno 5 sérií materiálu. Z každé série materiálu bylo během výroby změřeno 30 vyrobených blatníků a také byl odebrán plech pro výrobu vzorků, které byly následně v laboratoři podrobeny zkouškám. Při odebírání tohoto materiálu byl vždy označen směr válcování. Je to zároveň směr řezání polotovaru pro výrobu blatníků viz obr. 3.3, který je označován jako směr 0° .

Z jednoho odebraného vzorku plechu byl vyroben soubor osmnácti zkušebních tyček dle normy ČSN EN 10 002-1. (6 kusů pod úhlem 0° , 6 kusů pod úhlem 45° a 6 kusů pod úhlem 90°). V každém souboru byly zkušební tyčky označeny viz obr. 3.9.

Cílem měření bylo zjistit pomocí statické zkoušky tahem zda mechanické hodnoty u jednotlivých sérií zkoumaného materiálu jsou odlišné a jestli tyto odchylky mechanických hodnot mají vliv na požadovaný rozměr při výrobě. Dále byl úmysl určit jak se projeví předpokládaná anizotropie mechanických vlastností v závislosti na směru odebrání vzorku tvářeného materiálu.



Obr. 3.8: Universální trhačí stroj
TIRA test 2300



Obr. 3.9: Zkušební tyčky před statickou
zkouškou tahem

Statická zkouška tahem byla provedena na universálním trhačím stroji TIRA test 2300 Viz obr 3.8. dle normy ČSN EN 10 002-1. V každém směru série bylo měřeno 6 zkušebních vzorků viz obr. 3.9. Průměrné naměřené mechanické hodnoty u zkušebních tyček a výběrová směrodatná odchylka (v.s.od.) naměřených hodnot jsou uvedeny viz tab. 3.2.



Tab. 3.2: Naměřené průměrné mechanické hodnoty a výběrová směrodatná odchylka

Označení vzorků	A_g	$R_{p0,2}$	R_m	A_{50mm}
	%	MPa	MPa	%
1. - 90°	19,81	293,84	378,62	43,52
v. s. od.	2,55	19,01	3,55	2,98
1. - 45°	19,79	308,91	389,02	43,59
v. s. od.	0,69	8,46	4,91	1,90
1. - 0°	21,62	311,58	394,06	47,05
v. s. od.	0,71	6,74	2,75	1,03
2. - 90°	21,18	295,99	382,34	44,69
v. s. od.	0,87	6,45	5,74	0,87
2. - 45°	20,50	304,82	383,28	43,74
v. s. od.	0,54	5,16	3,75	1,44
2. - 0°	21,03	298,57	394,37	46,58
v. s. od.	0,42	3,51	8,45	0,69
3. - 90°	20,79	293,25	381,65	46,03
v. s. od.	0,28	5,29	3,22	0,72
3. - 45°	20,25	311,79	388,89	45,96
v. s. od.	0,40	4,50	5,00	0,79
3. - 0°	20,56	294,73	395,04	46,49
v. s. od.	0,44	4,75	4,76	0,55
4. - 90°	20,50	288,11	378,94	45,30
v. s. od.	0,36	2,51	3,28	0,80
4. - 45°	19,94	300,24	382,77	45,65
v. s. od.	0,25	2,79	4,14	0,70
4. - 0°	19,56	324,22	398,92	41,30
v. s. od.	0,81	3,52	3,20	3,76
5. - 90°	19,50	300,98	385,38	46,26
v. s. od.	0,22	4,25	3,03	2,84
5. - 45°	19,84	295,70	381,57	44,95
v. s. od.	0,38	2,83	3,33	1,28
5. - 0°	21,30	306,54	393,88	47,11
v. s. od.	0,40	3,10	3,40	0,85



Obr. 3.10: Zkušební tyčka po přetržení na trhačím stroji



Z naměřených mechanických vlastností zpracovávaného materiálu je zjevné, že mechanické hodnoty splňují hodnoty v nalezené normě EN 10025-2 S235JR. Materiál má jednoznačně dobrou tažnost, která byla přímo naměřena pomocí přídavného zařízení průtahoměru na univerzálním trhacím stroji TIRA test 2300 a vypočítaná dle výpočetní techniky.

3.3 Změřené rozměry při výrobě blatníku po operaci ohnutí

Tvarová a rozměrová přesnost blatníku se během celé výroby kontroluje dle technologického postupu. Po poslední operaci (ohnutí na hydraulickém lisu) je rozměrové kontrole podroben každý vyrobený kus. Požadovaný rozměr rozevření je měřen pomocí posuvného digitálního měřidla. Pokud rozměr nesplňuje požadovaný rozměr dle výrobního výkresu dochází k operaci navíc a to dorovnání.

Z každé série materiálu, bylo změřeno při výrobě 30 vyrobených blatníků. Naměřené hodnoty, střední hodnota a výběrová střední směrodatná odchylka u sérií tvářeného materiálu jsou zapsány viz tab. 3.3, tab. 3.4, tab. 3.5, tab. 3.6 a tab. 3.7.

Tab. 3.3: Změřený požadovaný rozměr rozevření u výlisků z tvářeného materiálu série 1

Série materiálu číslo 1			
Požadovaný rozměr je 359 ± 2 [mm]			
Díl:	Naměřeno	Díl:	Naměřeno
1.	363,22	16.	359,59
2.	364,20	17.	367,45
3.	365,51	18.	354,93
4.	362,59	19.	362,72
5.	361,43	20.	356,70
6.	363,92	21.	360,47
7.	355,56	22.	360,24
8.	363,89	23.	362,08
9.	362,71	24.	357,61
10.	354,94	25.	367,55
11.	360,59	26.	368,66
12.	357,97	27.	357,49
13.	361,27	28.	364,59
14.	359,24	29.	363,73
15.	365,01	30.	360,50
Průměrný rozměr - 361,55 [mm]			
Výběrová sm. odchylka - 3,685 [mm]			

Tab.3.4: Změřený požadovaný rozměr rozevření u výlisků z tvářeného materiálu série 2

Série materiálu číslo 2			
Požadovaný rozměr je 359 ± 2 [mm]			
Díl:	Naměřeno	Díl:	Naměřeno
31.	363,84	46.	368,04
32.	368,36	47.	357,86
33.	362,53	48.	364,14
34.	357,91	49.	357,01
35.	354,35	50.	359,23
36.	358,92	51.	366,53
37.	363,17	52.	357,71
38.	363,02	53.	368,05
39.	354,26	54.	364,27
40.	363,41	55.	368,55
41.	359,51	56.	361,39
42.	364,55	57.	359,49
43.	360,04	58.	361,96
44.	360,95	59.	360,05
45.	365,42	60.	360,36
Průměrný rozměr - 361,83 [mm]			
Výběrová sm. odchylka - 3,935 [mm]			



Tab. 3.5: Změřený požadovaný rozměr rozevření u výlisků z tvářeného materiálu série 3

Série materiálu číslo 3			
Požadovaný rozměr je 359 ± 2 [mm]			
Díl:	Naměřeno	Díl:	Naměřeno
61.	365,51	76.	361,77
62.	364,95	77.	360,39
63.	360,88	78.	364,01
64.	366,67	79.	365,90
65.	362,65	80.	368,26
66.	357,67	81.	367,37
67.	360,12	82.	358,23
68.	362,60	83.	357,35
69.	368,58	84.	366,45
70.	357,18	85.	358,84
71.	358,27	86.	367,05
72.	364,54	87.	364,08
73.	369,23	88.	355,99
74.	360,50	89.	364,65
75.	362,05	90.	357,79
Průměrný rozměr - 362,65 [mm]			
Výběrová sm. odchylka - 3,904 [mm]			

Tab.3.6:Změřený požadovaný rozměr rozevření u výlisků z tvářeného materiálu série 4

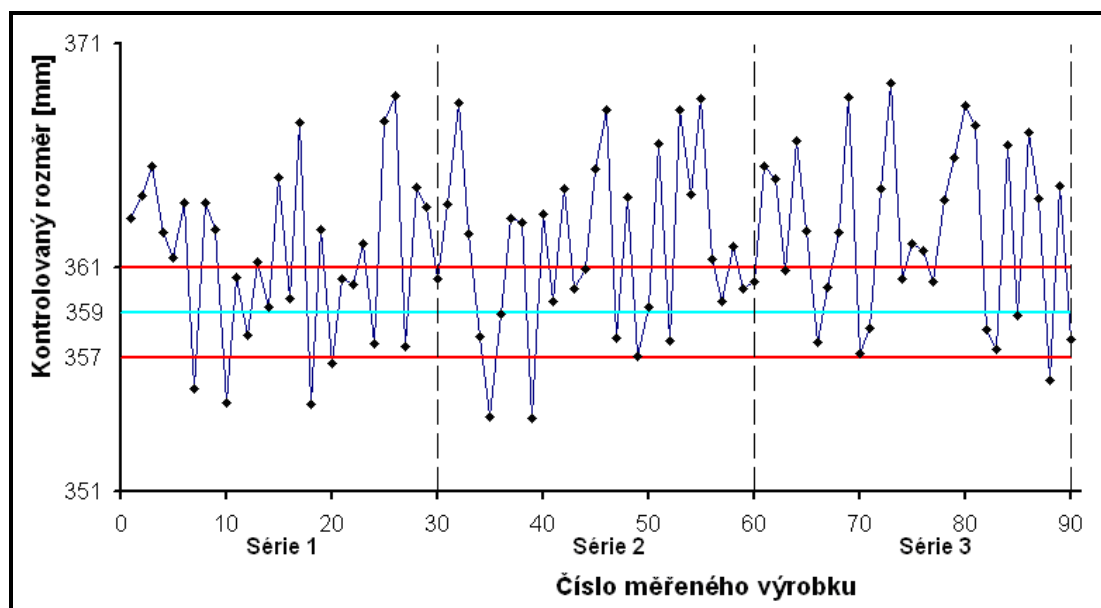
Série materiálu číslo 4			
Požadovaný rozměr je 359 ± 2 [mm]			
Díl:	Naměřeno	Díl:	Naměřeno
91.	361,45	106.	360,87
92.	359,12	107.	360,42
93.	360,92	108.	359,94
94.	355,49	109.	364,90
95.	362,63	110.	365,35
96.	364,81	111.	358,51
97.	356,40	112.	360,74
98.	354,25	113.	364,77
99.	357,68	114.	361,10
100.	368,92	115.	354,94
101.	360,38	116.	368,19
102.	358,75	117.	360,08
103.	365,40	118.	358,28
104.	369,03	119.	361,37
105.	359,87	120.	358,79
Průměrný rozměr - 361,11 [mm]			
Výběrová sm. odchylka - 3,894 [mm]			

Tab. 3.7: Změřený požadovaný rozměr rozevření u výlisků z tvářeného materiálu série 5

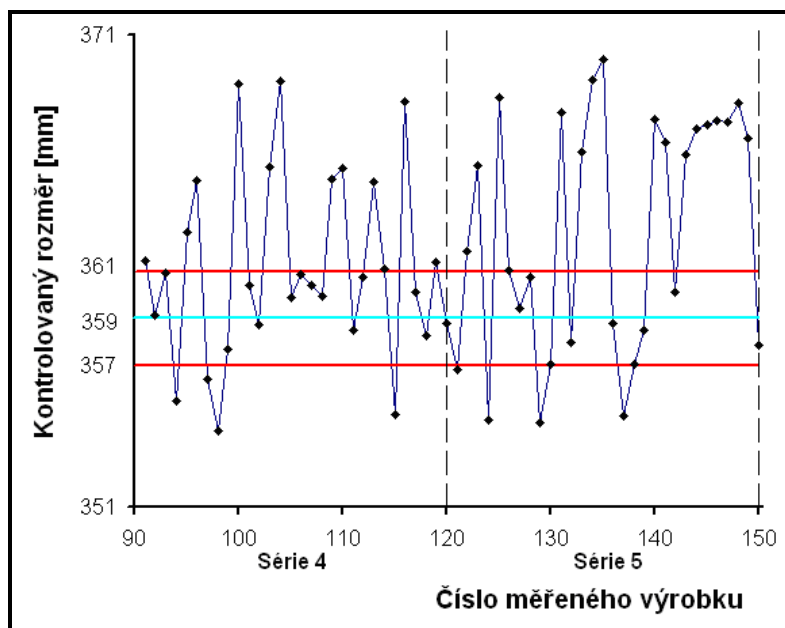
Série materiálu číslo 5			
Požadovaný rozměr je 359 ± 2 [mm]			
Díl:	Naměřeno	Díl:	Naměřeno
121.	356,85	136.	358,80
122.	361,84	137.	354,88
123.	365,47	138.	357,07
124.	354,66	139.	358,50
125.	368,35	140.	367,42
126.	361,05	141.	366,47
127.	359,41	142.	360,08
128.	360,73	143.	365,90
129.	354,56	144.	367,02
130.	357,03	145.	367,18
131.	367,70	146.	367,37
132.	357,95	147.	367,29
133.	366,03	148.	368,11
134.	369,11	149.	366,64
135.	369,95	150.	357,86
Průměrný rozměr - 362,71 [mm]			
Výběrová sm. odchylka - 5,039 [mm]			



K přehlednosti odchylek od požadovaného rozměru jsou změřené hodnoty kontrolovaného rozměru znázorněny graficky viz obr. 3.11 a viz obr. 3.12.



Obr. 3.11: Odchylky požadovaného rozměru výrobků ze série 1, 2, 3



Obr. 3.12: Odchylky požadovaného rozměru výrobků ze série 4, 5

Naměřené hodnoty vykazují rozdílnost rozměrů kontrolovaného požadovaného rozměru rozevření blatníku při výrobě. Dodatečná operace dorovnání ve všech sériích zpracovávaného materiálu je nutná. Většina změřených výlisků, které nesplňovaly toleranci při výrobě měly naměřený kontrolovaný rozměr větší než je dovolená horní odchylka tolerovaného rozměru.

**3.3.1 Výpočet pravděpodobnosti splnění tolerance rozměru [12]**

Cílem tohoto výpočtu je zjistit pravděpodobnostní počet výlisků P , které splňovaly toleranci požadovaného rozměru u jednotlivých sérií tvářeného materiálu. Ukázkový výpočet je názorně proveden pro naměřené hodnoty ze zpracovávaného materiálu série 1. K zahájení pravděpodobnostního výpočtu je nejprve nutné vypočítat střední hodnotu rozměrů \bar{x}_1 a výběrovou směrodatnou odchylku $\bar{\sigma}_{(n-1)_1}$ z naměřených hodnot v sérii 1, viz tab. 3.8.

Tab. 3.8: Vstupní hodnoty potřebné pro výpočet pravděpodobnosti P_1

Vstupní hodnoty pro výpočet P_1 (pravděpodobnost splnění tolerance rozměru ze série 1 zpracovávaného materiálu)			
Počet měřených dílů	n	$[-]$	30
Střední hodnota rozměrů	\bar{x}_1	$[mm]$	361,545
Výběrová směrodatná odchylka	$\bar{\sigma}_{(n-1)_1}$	$[mm]$	3,6855
Požadovaný rozměr	x	$[mm]$	359±2
Maximální tolerovaný rozměr	x_1	$[mm]$	361
Minimální tolerovaný rozměr	x_2	$[mm]$	357

$$u_1 = \frac{x_1 - \bar{x}_1}{\bar{\sigma}_{(n-1)_1}} \quad (3.1)$$

$$u_1 = \frac{361 - 361,545}{3,6855} = -1,233$$

$$u_2 = \frac{x_2 - \bar{x}}{\bar{\sigma}_{(n-1)_1}} \quad (3.2)$$

$$u_2 = \frac{357 - 361,545}{3,6855} = -0,147$$

Pomocí distribuční funkce normálního normovaného rozdělení

$$\Phi_{(u)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^u e^{-\frac{x^2}{2}} dx \cdot [10^4] \quad (3.3)$$

$$\Phi_{(u_1)} = \Phi_{(-0,147)} = 1 - 0,5596 = 0,4404$$

$$\Phi_{(u_2)} = \Phi_{(-1,233)} = 1 - 0,8907 = 0,1093$$

$$P(x_2 \leq x \leq x_1) = \Phi_{(u_1)} - \Phi_{(u_2)} \quad (3.4)$$

$$P_1(357 \leq x \leq 361) = 0,4404 - 0,1093 = 0,3311$$

P_1 - Pravděpodobnostní počet splnění tolerance rozměru z tvářeného materiálu série 1 je 33,11%.



Pravděpodobnost výskytu rozměru byla popsána normálním rozdělením a velikosti vypočítané pravděpodobnosti jsou zapsané v tab. 3.9.

Tab. 3.9: Vstupní hodnoty potřebné pro výpočet pravděpodobnostního počtu splnění rozměru P a vypočítaná jeho velikost

Číslo série materiálu			1	2	3	4	5
Počet měřených dílů	n	$[-]$	30	30	30	30	30
Střední hodnota	\bar{x}	$[mm]$	361,54	361,83	362,65	361,11	352,71
Střední výběrová směrodatná odchylka	$\sigma_{(n-1)}$	$[mm]$	3,685	3,935	3,904	3,984	5,0393
Požadovaný rozměr	x	$[mm]$	359±2				
Pravděpodobnostní počet splnění tolerance	P	$[%]$	33,11	30,75	26,37	34,51	24,15

3.4 Stanovení závislosti naměřených hodnot

Při zkoumání odchylek požadovaného rozměru byly naměřeny mechanické hodnoty u jednotlivých sérií materiálu. U těchto sérií byl také měřen rozměr rozevření přímo při výrobě. Pro stanovení vlivu mechanických hodnoty tváření materiálu na výrobu, jsou uvažovány pouze hodnoty ve směru válcování, tedy ve směru řezání plazmou. Což byly hodnoty zkoumaných vzorků ve směru 0°. Z naměřených hodnot požadovaného rozměru z každé série byla vypočítána střední hodnota \bar{x} a poté i pravděpodobnostní počet dodržení předepsaného rozměru P . Tyto hodnoty byly porovnány s naměřenými mechanickými hodnotami viz tab. 3.10.

Tab. 3.10: Porovnání naměřených hodnot v podélném směru 0°

Číslo série	$R_{p0,2}$ $[MPa]$	R_m $[MPa]$	A $[%]$	\bar{x} $[mm]$	P $[%]$
1	311,58	394,06	47,05	361,55	33,11
2	298,57	394,37	46,58	361,83	30,75
3	294,73	395,04	46,49	362,65	26,37
4	324,22	398,92	41,30	361,11	34,51
5	306,54	393,88	47,11	362,71	24,15

3.4.1 Výpočet existence závislosti [12]

Pro posouzení závislosti mechanických hodnot materiálu na velikost odchylek ve výrobě byla použita korelace náhodné veličiny a regresivní analýza. Vstupní hodnoty potřebné pro výpočet posouzení existence závislosti jsou uvedeny viz. tab. 3.11.



Tab. 3.11 Vstupní hodnoty pro výpočet koeficientu korelace

Číslo série zpracovávaného materiálu	$R_{p0,2}$ [MPa]	\bar{x} [mm]
1	311,58	361,55
2	298,57	361,83
3	294,73	362,65
4	324,22	361,11
5	306,54	362,71
Střední hodnota sérií \bar{x}	307,128	361,97
Výběrová směrodatná odchylka sérií $\sigma_{(n-1)}$	11,61	0,697

Pro výpočet bylo voleno:

- nezávislá náhodná veličina x ... naměřená smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$
- závislá náhodná veličina y ... střední hodnota \bar{x}

Kovariance K_{xy} :

$$K_{xy} = E(x \cdot y) - E(x) \cdot E(y) = \frac{1}{n} \cdot \sum x_i \cdot y_i - \left(\frac{1}{n} \cdot \sum x_i \right) \cdot \left(\frac{1}{n} \cdot \sum y_i \right) \quad (3.5)$$

$$K_{xy} = 111166,27 - 307,128 \cdot 361,97 = -4,85$$

$\Rightarrow K_{xy} \neq 0$ - proto veličiny jsou korelované. Velikost závislosti je popsána koeficientem kovariance dle vztahu (6.4.2)

Koeficient kovariance ρ_{xy} :

$$\rho_{xy} = \frac{|K_{xy}|}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \quad (3.6)$$

$$\rho_{xy} = \frac{4,85}{11,61 \cdot 0,697} = 0,599$$

$\rho_{xy} \cong 60\% \Rightarrow$ Z naměřených hodnot byla nalezena 60% existence závislosti mezi veličinami. Existence závislosti je poměrně nízká, proto z výsledku lze pouze konstatovat, že pomocí regresivní analýzy, byla získána jen přibližná regresivní funkce Y (6.4.3) a velikost regresivního koeficientu (6.4.5). Tato funkce byla získána vypočítaná pomocí grafu viz obr. 3.13.

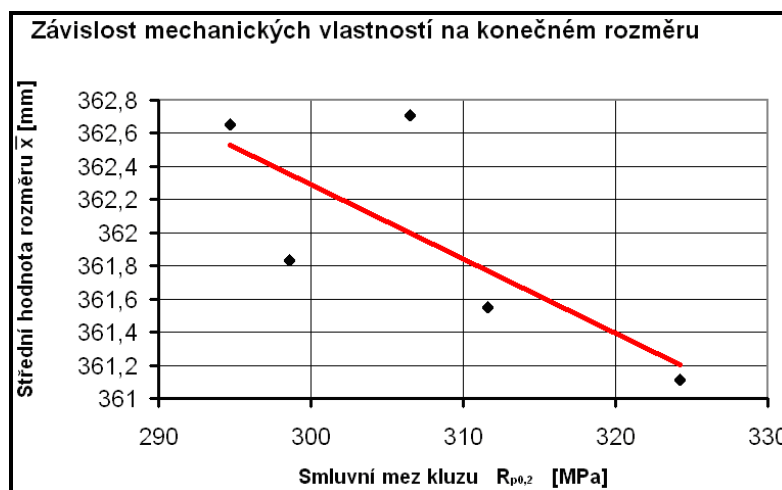
Regresivní funkce Y :

$$Y = -0,0449 \cdot x + 375,77 \quad (3.7)$$

Regresivní koeficient r_{xy} :

$$-1 \leq r_{xy} \leq 1 \quad (3.8)$$

$$r_{xy} = 0,56$$



Obr. 3.13: Závislost mechanických vlastností pomocí regresivní funkce Y

Proložení regresivní funkce není zcela objektivní, zvláště vzhledem k rozptylu a malému počtu dat, přestože zkoumané data jsou už střední hodnoty.

Z koeficientu kovariance ρ_{xy} lze konstatovat, že v tomto případě mechanické vlastnosti zpracovávaného materiálu nemají hlavní vliv na odchylky ve výrobě. Z dosažených výsledků by bylo vhodné přikročit ke konstrukční úpravě nástroje.

3.5 Ověření výpočtu odpružení blatníku dle teorie

Teorie ohýbání a odpružení jsou popsány v teoretické části této předkládané práce v kapitole 2.2.3 a 2.2.4. Z těchto částí jsou využity výpočtové vztahy (2.13) a (2.19).

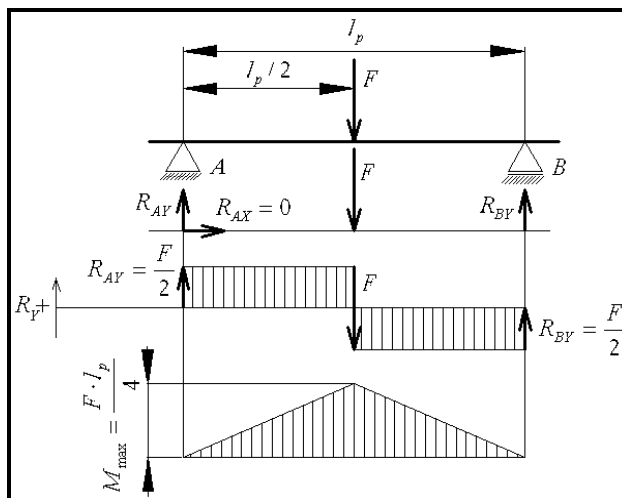
$$M = \frac{b \cdot s^2}{4} \cdot \sigma_{1p} \quad (2.13)$$

$$\Delta\alpha = \frac{M \cdot l}{E \cdot J} \cdot (1 - \mu^2) = \frac{2 \cdot \sigma_{1p}}{s \cdot E} \cdot (1 - \mu^2) \quad (2.19)$$

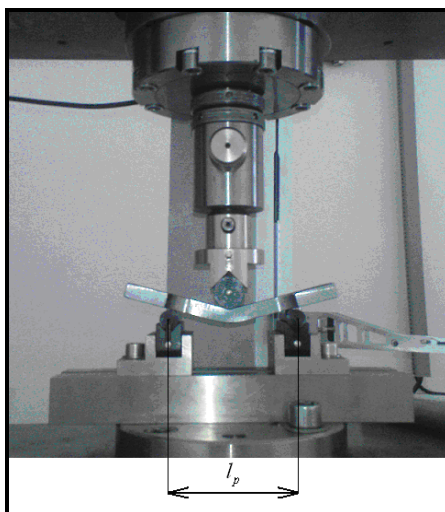
K získání maximálního ohybového momentu byl odvozen vztah (3.9) dle uvolnění nosníku viz obr. 3.14. Síla F byla získána experimentálně během ohybu při zvoleném maximálním průhybu y . Během statické zkoušky v ohybu viz obr. 3.15. Vzdálenost os podpěr l_p bylo změřeno viz tab. 3.12.



$$M = \frac{F \cdot l_p}{4} \quad (3.9)$$



Obr. 3.14: Uvolnění nosníku o dvou podpěrách



Obr. 3.15: Statická zkouška ohybem na universálním trhačím stroji TIRA test 2300

Tab. 3.12: Změřené hodnoty vzdálenosti os podpěr l_p

Číslo měření	1.	2.	3.	4.	5.	Průměrná hodnota
$l_p [mm]$	100,56	100,49	100,60	100,58	100,54	100,554

Při statické zkoušce ohybem byla snaha napodobit ohyb při výrobě dílu a získat ohybový moment potřebný pro teoretický výpočet zpevnění tohoto materiálu. S touto hodnotou zpevnění bylo dále vypočítáno teoretické odpružení po ohnutí vzorku.

**Potřebné vzorce pro teoretický výpočet odpružení:**

$$M = \frac{F \cdot l_p}{4} \quad (3.9)$$

$$M = \frac{b \cdot s^2}{4} \cdot \sigma_{1P} \quad (2.13)$$

$$\Rightarrow \sigma_{1P} = \frac{M \cdot 4}{b \cdot s^2}$$

Velikost odpružení:

$$\Delta\alpha_T^\circ = \frac{2 \cdot \sigma_{1P}}{s \cdot E} \cdot (1 - \mu^2) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (3.10)$$

Velikost ohybového momentu M je změřena v závislosti na průhybu y zkušební tyčky na universálním trhačím stroji TIRA Test 2300. Jako vstupní hodnota byla použita maximální síla F , která působí při zadaném maximálním průhybu $y = 12[mm]$. Pomocí vztahu (2.13) byla vypočítána velikost přetvárného odporu σ_{1P} a poté dle vztahu (3.10) teoretické odpružení $\Delta\alpha_T^\circ$, při změřeném zatížení viz tab. 3.13. Při výpočtech byl volen modul pružnosti v tahu $E = 2,1 \cdot 10^5 [MPa]$ a Poissonova konstanta $\mu = 0,3[-]$.

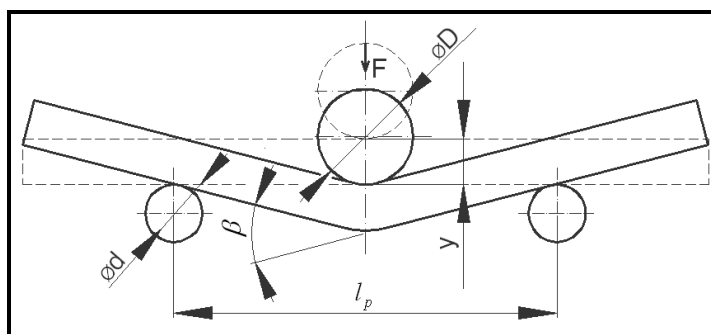
Tab. 3.13: Vypočtené hodnoty při zvoleném průhybu 12 [mm]

Vzorek	F [N]	l_p [mm]	b [mm]	s [mm]	M [Nmm]	W [mm ³]	σ_{1P} [MPa]	$\Delta\alpha_T^\circ$ [°]
1_0°	8628,3	100,554	12,81	12,1	216902,5	468,87	462,59	0,0189
1_45°	8701,8	100,554	12,72	12,15	218750,2	469,43	465,98	0,0190
1_90°	8727,9	100,554	12,83	12,21	219406,3	478,18	458,82	0,0186
2_0°	8676,5	100,554	12,68	12,17	218114,2	469,50	464,56	0,0189
2_45°	8621,1	100,554	12,66	12,14	216721,5	466,45	464,61	0,0190
2_90°	8835,8	100,554	12,68	12,1	222118,8	464,11	478,58	0,0196
3_0°	8660,3	100,554	12,53	12,2	217706,9	466,24	466,94	0,0190
3_45°	8931,4	100,554	12,61	12,18	224522	467,68	480,07	0,0195
3_90°	8621,4	100,554	12,49	12,19	216729,1	463,99	467,09	0,0190
4_0°	8516,9	100,554	12,72	12,13	214102,1	467,89	457,58	0,0187
4_45°	8898,2	100,554	12,75	12,15	223687,4	470,54	475,37	0,0194
4_90°	8732	100,554	12,86	12,1	219509,4	470,70	466,33	0,0191
5_0°	8831	100,554	12,73	12,14	221998,1	469,03	473,30	0,0193
5_45°	8892,5	100,554	12,68	12,2	223544,1	471,82	473,78	0,0192
5_90°	8759	100,554	12,57	12,18	220188,1	466,19	472,30	0,0192



Po ohybu během výpočtu bylo zjištěno, že velikost odpružení je poměrně stejná u všech zkoušených vzorků. Velikost odpružení se při zadaném průhybu zkoumaného materiálu pohybuje ve dvou setinách stupně.

Z výrobního výkresu blatníku viz. příloha 1 je patrné, že požadovaný rozměr rozevření $359 \pm 2 [mm]$ je závislý na odchylce úhlu ohnutí $121,5^\circ$. Aby byl splněn požadovaný rozměr, tak přepočítaná tolerance na úhel ohnutí je $\pm 0,5^\circ$, za předpokladu, že předcházející operace splňují tvarovou a rozměrovou přesnost.

Obr. 3.16: Schéma doplňkového úhlu β

Tab. 3.14: Délkové rozměry

Označení	$\varnothing D$	$\varnothing d$	l_p	y
Jednotky	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Velikost	25	15	100,554	12

Prakticky změřená hodnota odpružení $\Delta\alpha_p^\circ$, byla změřena pomocí profilprojektoru v laboratoři, na kterém je možné rozlišení úhlu po $2'$. Přes doplňkový úhel β viz obr. 3.16 u odebraných vzorků v podélném směru, tedy ve směru 0° .

Tyto naměřené hodnoty byly porovnány z teoreticky vypočítaným odpružením $\Delta\alpha_T^\circ$ viz tab. 3.13. Hodnoty prakticky změřeného odpružení $\Delta\alpha_p^\circ$ se pohybují dle měření o jeden řád výše než hodnoty dle teorie výpočtu pro odpružení viz tab. 3.15.

Tab. 3.15: Velikost odpružení u zkoumaných vzorků ve směru 0°

Vzorek	1_0°	2_0°	3_0°	4_0°	5_0°
$\Delta\alpha_p^\circ [^\circ]$	0,12	0,15	0,12	0,18	0,15



4. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo určit vliv mechanických hodnot na velikost odpružení při výrobě blatníku vysokozdvížného vozíku z materiálu S235JR dle EN 10025-2 a stanovení, zda hlavní příčinou odchylek od požadovaného rozměru při ohýbání je rozdílnost mechanických hodnot zpracovávaného materiálu nebo konstrukce nástroje.

V rámci bakalářské práce bylo zkoumáno 5 sérií materiálu. Z každé zpracovávané série materiálu byl měřen na 30-ti kusech požadovaný rozměr výrobku. Z hlediska statistického vyhodnocení se jedná o dostatečně reprezentativní soubor měření. Pro každý testovaný materiál byly v souladu s EN 10002-1 zjištěny pomocí statické zkoušky tahem mechanické hodnoty zpracovávaného materiálu. Dále byla provedena zkouška ohybem pro zjištění závislosti ohybové síly a průhybu, která měla napodobit podmínky vznikající při výrobě blatníku.

Z výsledků měření mechanických vlastností materiálu S235JR EN 10025-2 lze konstatovat, že jednotlivé testované série vykazují odchylky v naměřených hodnotách. Odchylky mechanických hodnot jednotlivých sérií však nevybočují z předepsaného tolerančního pole pro zkoumaný materiál daného normou.

Naměřené mechanické hodnoty jednotlivých sérií a hodnoty požadovaného rozměru výlisku byly použity pro statistické vyhodnocení experimentu. V kapitole 3.3.1 je provedeno statistické vyhodnocení, kdy je vypočítána pravděpodobnost splnění tolerance požadovaného rozměru pro jednotlivé série zpracovávaného materiálu. Z výsledků je patrné, že pravděpodobnost splnění tolerance požadovaného rozměru se pohybuje v rozmezí 24 až 34%. Při zjišťování závislosti mechanických hodnot materiálu na velikosti požadovaného rozměru byla použita korelace náhodné veličiny a regresivní analýza. Výpočet je proveden v kapitole 3.4.1. Z této analýzy bylo zjištěno, že závislost mezi sledovanými veličinami je pouze 60%. Na základě provedených experimentů a statistického vyhodnocení lze tedy konstatovat, že mechanické hodnoty zpracovávaného materiálu nemají hlavní vliv na odchylky při výrobě blatníku vysokozdvížného vozíku ve firmě Auto Závod Český Dub, spol. s r.o. Vzhledem k tomu, že většina naměřených odchylek kontrolovaného rozměru vykazuje kladné úchytky, doporučil bych konstrukční úpravu stávajícího nástroje. V současně používaném nástroji pravděpodobně nedochází k dostatečné kalibraci konečného rozměru výlisku. Pokud by toto řešení, vedoucí ke zvýšení kalibrační síly, neodpovídalo představám výrobce, doporučil bych výrobu nového nástroje, u kterého by byla snaha snížit počet výrobních operací a zvýšit přesnost výrobku.



V předkládané bakalářské práci byl ověřován teoretický vztah pro výpočet odpružení. V kapitole 3.5 je vypočítána teoretická velikost odpružení pro testovaný materiál S235JR dle EN 10025-2. V konfrontaci s experimentálně zjištěnou hodnotou odpružení je vidět, že teoreticky získaná hodnota odpružení je téměř 10x menší než skutečnost. Doporučuji proto při případné výrobě nového nástroje nejprve experimentálně určit velikosti odpružení daného materiálu s ohledem na změnu jeho mechanických hodnot a s touto hodnotou pracovat při návrhu nového nástroje.



5. Seznam použité literatury

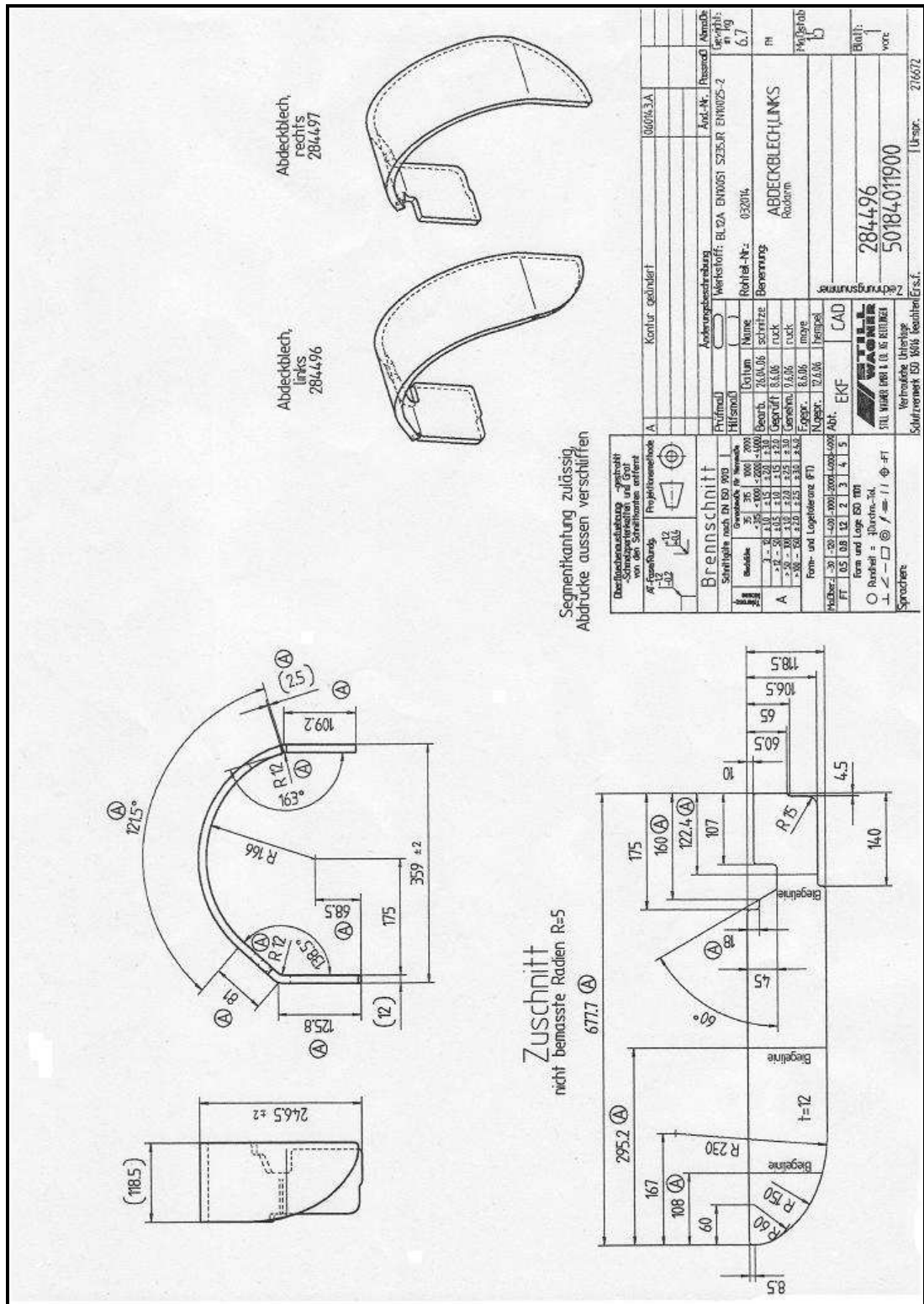
- [1] Lenfeld P.: *Technologie II. - 1. část*. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2005. ISBN 80-7372-020-5.
- [2] Řasa J., Leinveber J., Vávra P.: *Strojírenská technologie 2*. Praha : SNTL, 2000. ISBN 04-221-79.
- [3] CHaloupecký, V.: *Technologie II*. Liberec : Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1985. ISBN 55-807-84.
- [4] Forejt, M.: *Teorie tváření*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 1992. ISBN 80-214-0415-9.
- [5] Marciniak Z.: *Teorie tváření plechů*. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1964. ISBN 04-275-64.
- [6] Holina, J.: *Určení mezních stavů a velikosti odpružení při ohýbání pevnostního plechu, [Diplomová práce]*. Liberec : TUL, 2003.
- [7] Hrubý J.: březen 2009. <http://www.345.vsb.cz/jirihruby/Texty/11Anizotrop.pdf>
- [8] Tměj J., Mikeš V.: *Teorie tváření*. Liberec : Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1981.
- [9] Řasa J., Leinveber J., Vávra P.: *Strojírenská technologia 1* . Praha : SNTL, 2000. ISBN 04-251-81.
- [10] Řasa J., Leinveber J., Vávra P.: *Strojnické tabulky* . Praha : Scientia, 1998. ISBN 80-7183-123-9.
- [11] Moc L. : *Cvičení z inženýrské statistiky*, Liberec: TUL, 2006



6. Seznam příloh

- Příloha 1: Výrobní výkres blatníku
- Příloha 2: Protokoly ze statické zkoušky tahem z materiálu série 1
- Příloha 3: Protokoly ze statické zkoušky tahem z materiálu série 2
- Příloha 4: Protokoly ze statické zkoušky tahem z materiálu série 3
- Příloha 5: Protokoly ze statické zkoušky tahem z materiálu série 4
- Příloha 6: Protokoly ze statické zkoušky tahem z materiálu série 5

Příloha 1





Příloha 2

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : ČSN EN 10025-2 (S235JR)

Norma: : ČSN - EN 10002-1

Rozměr vzorku: : (12 x 12,5) mm

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.

Datum zkoušky: : 29. 3. 2009

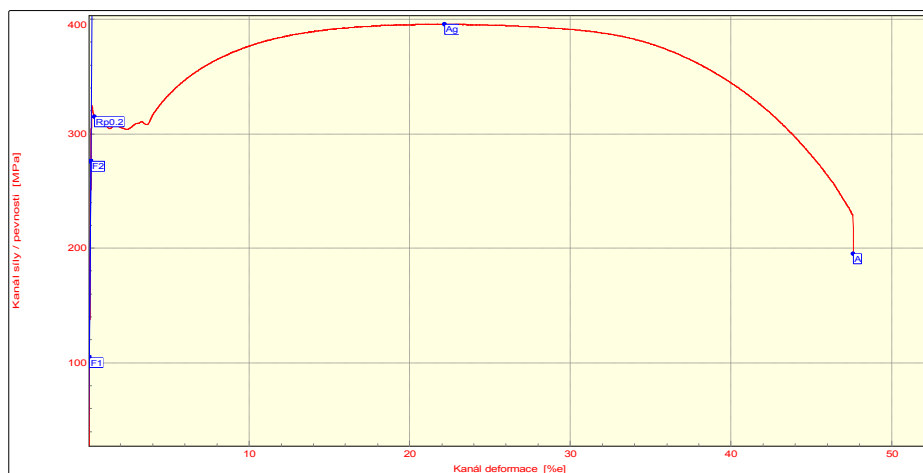
Vypracoval: : Kirschner Vít

Směr odebrání vzorku: : série 1-0°

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Ag %	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %
1	21.95	314.88	395.56	47.49
2	20.50	299.73	389.88	45.70
3	22.40	315.87	396.58	48.46
4	21.53	312.55	392.72	46.56
5	21.74	314.89	395.57	47.02

Statistická hodnota	Ag %	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	21.62	311.58	394.06	47.05
Směrodatná odchylka	0.71	6.74	2.75	1.03



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

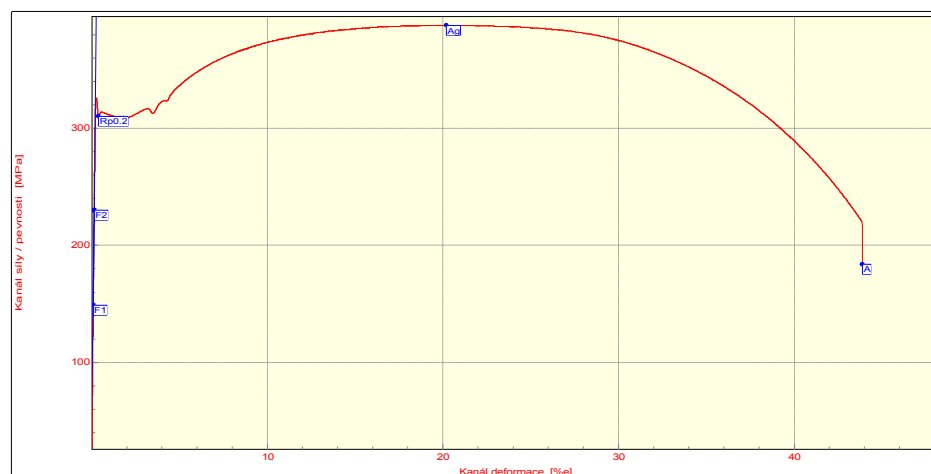
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : ČSN EN 10025-2 (S235JR)
Norma: : ČSN - EN 10002-1
Rozměr vzorku: : (12 x 12,5) mm
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.
Datum zkoušky: :
Vypracoval: : Kirschner Vít
Směr odebrání vzorku : serie 1-45°

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Ag %	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %
1	19.55	311.54	389.66	42.89
2	20.91	294.09	381.16	46.80
3	19.95	310.37	388.07	43.76
4	19.17	314.08	392.86	42.05
5	19.36	314.46	393.33	42.46

Statistická hodnota	Ag %	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	19.79	308.91	389.02	43.59
Směrodatná odchylka	0.69	8.46	4.91	1.90



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

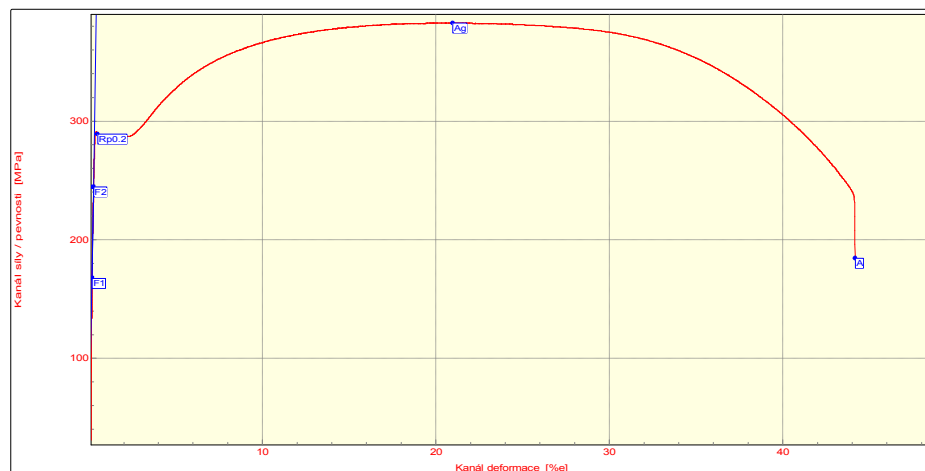
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : ČSN EN 10025-2 (S235JR)
Norma: : ČSN - EN 10002-1
Rozměr vzorku: : (12 x 12,5) mm
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.
Datum zkoušky: : 29. 3. 2009
Vypracoval: : Kirschner Vít
Směr odebrání vzorku : serie 1-90°

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Ag %	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %
1	15.28	327.58	381.23	38.29
2	21.06	285.71	378.82	45.10
3	21.30	284.72	376.76	45.57
4	20.88	282.26	373.67	44.67
5	20.55	288.92	382.59	43.97

Statistická hodnota	Ag %	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	19.81	293.84	378.62	43.52
Směrodatná odchylka	2.55	19.01	3.55	2.98



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



Příloha 3

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : ČSN EN 10025-2 (S235JR)

Norma: : ČSN - EN 10002-1

Rozměr vzorku: : (12 x 12,5) mm

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.

Datum zkoušky: : 29. 3. 2009

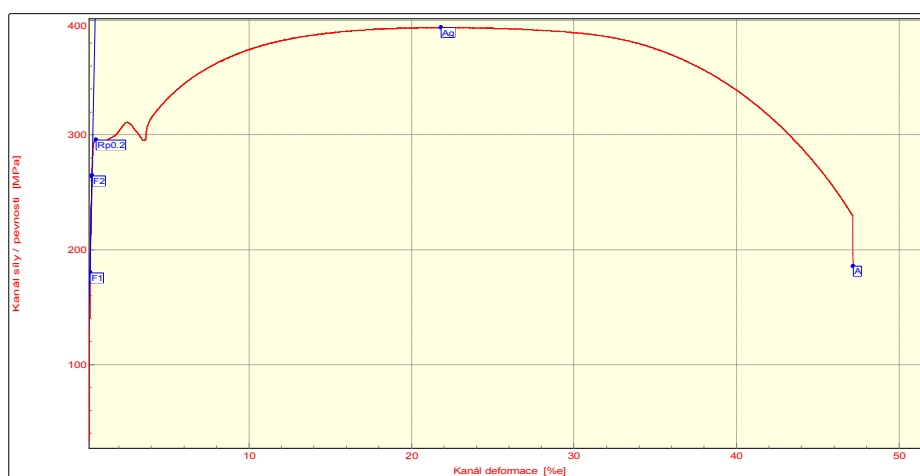
Vypracoval: : Kirschner Vít

Směr odebrání vzorku : série 2-0°

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Ag %	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %
1	21.05	294.57	393.07	46.42
2	20.54	299.47	381.53	46.61
3	20.69	303.00	403.66	45.55
4	21.53	300.35	400.05	47.41
5	21.32	295.44	393.53	46.93

Statistická hodnota	Ag %	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	21.03	298.57	394.37	46.58
Směrodatná odchylka	0.42	3.51	8.45	0.69



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : ČSN EN 10025-2 (S235JR)

Norma: : ČSN - EN 10002-1

Rozměr vzorku: : (12 x 12,5) mm

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.

Datum zkoušky: : 29. 3. 2009

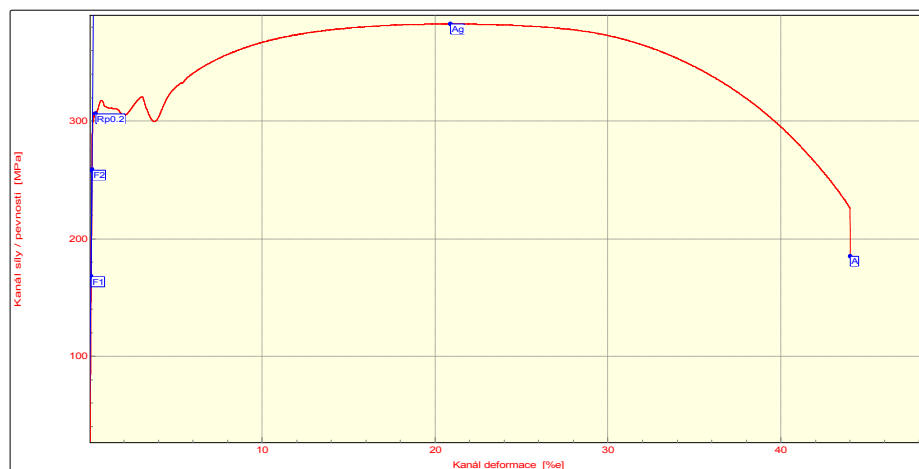
Vypracoval: : Kirschner Vít

Směr odebrání vzorku : série 2-45°

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Ag %	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %
1	20.24	305.00	380.33	43.04
2	21.30	297.06	385.04	46.05
3	19.86	304.22	379.54	42.20
4	20.67	306.45	382.69	43.92
5	20.46	311.39	388.78	43.48

Statistická hodnota	Ag %	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	20.50	304.82	383.28	43.74
Směrodatná odchylka	0.54	5.16	3.75	1.44



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : ČSN EN 10025-2 (S235JR)

Norma: : ČSN - EN 10002-1

Rozměr vzorku: : (12 x 12,5) mm

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.

Datum zkoušky: :

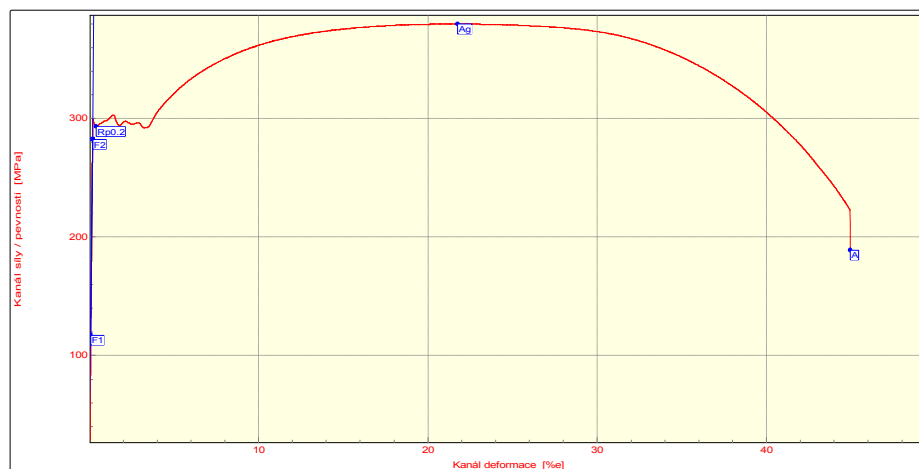
Vypracoval: : Kirschner Vít

Směr odebrání vzorku : série 2-90°

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Ag %	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %
1	21.48	293.16	379.81	44.82
2	19.72	307.43	392.42	43.67
3	21.06	293.27	379.99	43.94
4	21.92	291.85	378.19	45.74
5	21.70	294.26	381.31	45.28

Statistická hodnota	Ag %	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	21.18	295.99	382.34	44.69
Směrodatná odchylka	0.87	6.45	5.74	0.87



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

**Příloha 4****STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM****VSTUPNÍ PARAMETRY**

Testovaný materiál: : ČSN EN 10025-2 (S235JR)

Norma: : ČSN - EN 10002-1

Rozměr vzorku: : (12 x 12,5) mm

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.

Datum zkoušky: : 29. 3. 2009

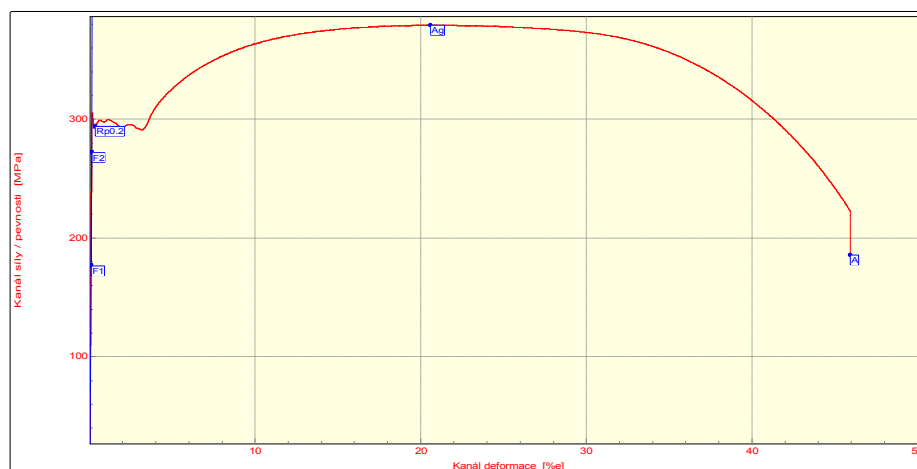
Vypracoval: : Kirschner Vít

Směr odebrání vzorku : série 3-90°

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Ag %	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %
1	20.80	292.93	377.56	46.75
2	21.08	284.54	384.67	45.41
3	20.41	294.04	379.08	45.84
4	21.03	296.50	382.41	47.23
5	20.61	298.24	384.54	46.29

Statistická hodnota	Ag %	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	20.79	293.25	381.65	46.30
Směrodatná odchylka	0.28	5.29	3.22	0.72

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : ČSN EN 10025-2 (S235JR)

Norma: : ČSN - EN 10002-1

Rozměr vzorku: : (12 x 12,5) mm

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.

Datum zkoušky: : 29. 3. 2009

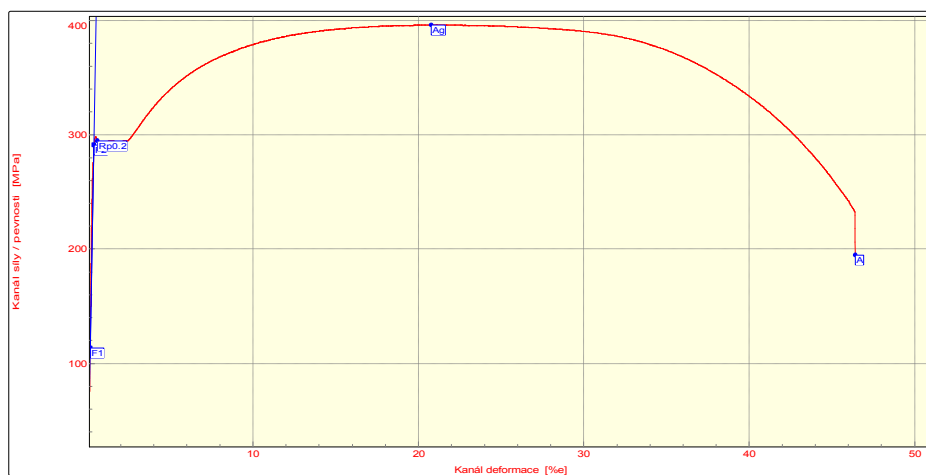
Vypracoval: : Kirschner Vít

Směr odebrání vzorku : série 3-0°

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Ag %	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %
1	20.25	294.67	395.95	46.16
2	21.21	286.80	387.20	46.75
3	20.51	299.02	399.52	46.66
4	20.10	297.63	397.87	45.74
5	20.72	295.50	394.67	47.14

Statistická hodnota	Ag %	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	20.56	294.73	395.04	46.49
Směrodatná odchylka	0.44	4.75	4.76	0.55



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : ČSN EN 10025-2 (S235JR)

Norma: : ČSN - EN 10002-1

Rozměr vzorku: : (12 x 12,5) mm

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.

Datum zkoušky: : 29. 3. 2009

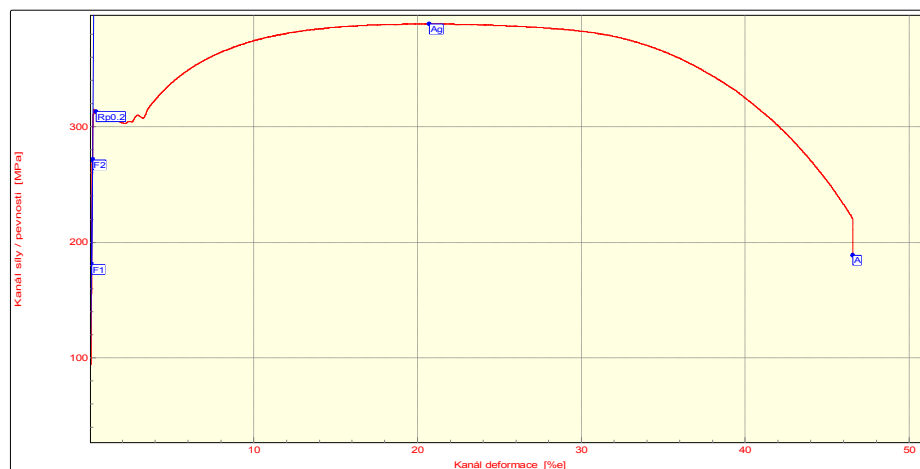
Vypracoval: : Kirschner Vít

Směr odebrání vzorku : série 3-45°

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Ag %	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %
1	19.68	308.22	391.21	44.91
2	20.28	318.99	395.80	45.98
3	20.71	308.12	382.83	46.93
4	20.50	313.05	388.88	46.46
5	20.10	310.58	385.73	45.54

Statistická hodnota	Ag %	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	20.25	311.79	388.89	45.96
Směrodatná odchylka	0.40	4.50	5.00	0.79



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



Příloha 5

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

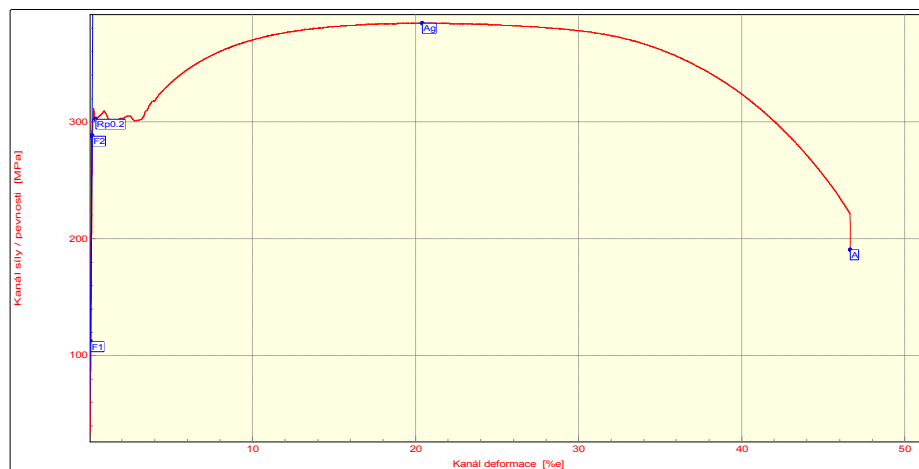
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : ČSN EN 10025-2 (S235JR)
Norma: : ČSN - EN 10002-1
Rozměr vzorku: : (12 x 12,5) mm
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.
Datum zkoušky: : 29. 3. 2009
Vypracoval: : Kirschner Vít
Směr odebrání vzorku : série 4-45°

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Ag %	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %
1	20.18	300.60	386.60	44.77
2	20.17	302.11	384.30	46.55
3	19.98	303.46	386.08	46.09
4	19.78	296.45	377.13	45.64
5	19.59	298.57	379.77	45.19

Statistická hodnota	Ag %	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	19.94	300.24	382.77	45.65
Směrodatná odchylka	0.25	2.79	4.14	0.70



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : ČSN EN 10025-2 (S235JR)

Norma: : ČSN - EN 10002-1

Rozměr vzorku: : (12 x 12,5) mm

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.

Datum zkoušky: : 29. 3. 2009

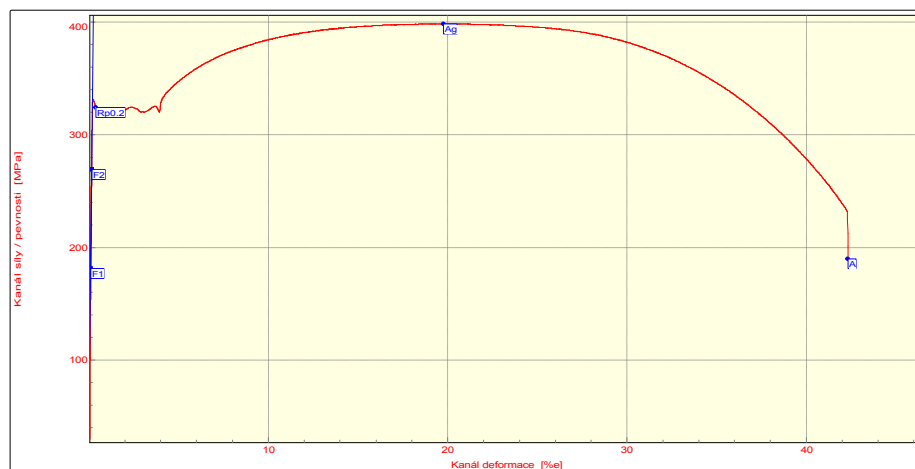
Vypracoval: : Kirschner Vít

Směr odebrání vzorku : série 4-0°

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Ag %	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %
1	18.22	319.00	394.89	34.67
2	19.93	323.62	397.68	43.05
3	20.34	328.68	403.52	43.93
4	19.74	325.68	400.21	42.63
5	19.55	324.13	398.30	42.21

Statistická hodnota	Ag %	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	19.56	324.22	398.92	41.30
Směrodatná odchylka	0.81	3.52	3.20	3.76



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

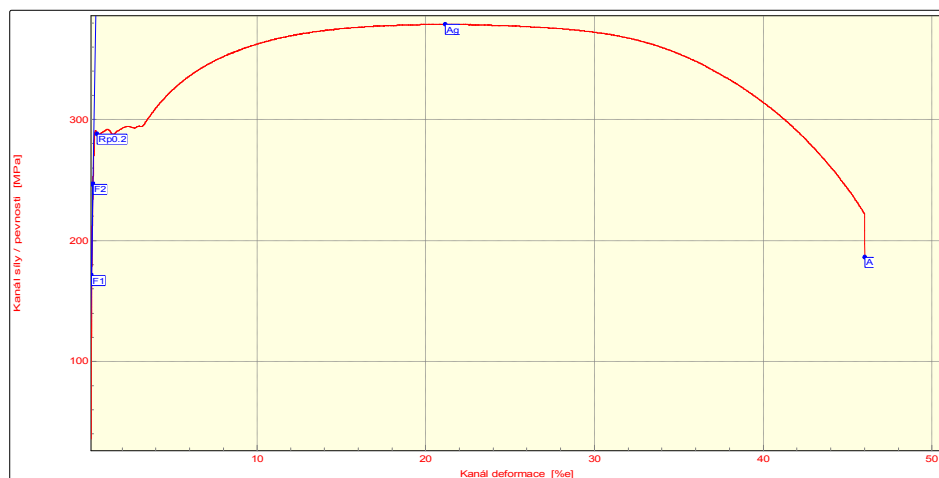
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : ČSN EN 10025-2 (S235JR)
Norma: : ČSN - EN 10002-1
Rozměr vzorku: : (12 x 12,5) mm
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.
Datum zkoušky: : 29. 3. 2009
Vypracoval: : Kirschner Vít
Směr odebrání vzorku: série 4-90°

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Ag %	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %
1	20.52	286.95	377.54	45.32
2	20.94	290.25	381.66	46.28
3	20.72	287.85	378.55	45.81
4	20.31	284.66	374.40	44.90
5	20.00	290.82	382.54	44.20

Statistická hodnota	Ag %	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	20.50	288.11	378.94	45.30
Směrodatná odchylka	0.36	2.51	3.28	0.80



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



Příloha 6

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : ČSN EN 10025-2 (S235JR)

Norma: : ČSN - EN 10002-1

Rozměr vzorku: : (12 x 12,5) mm

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.

Datum zkoušky: : 29. 3. 2009

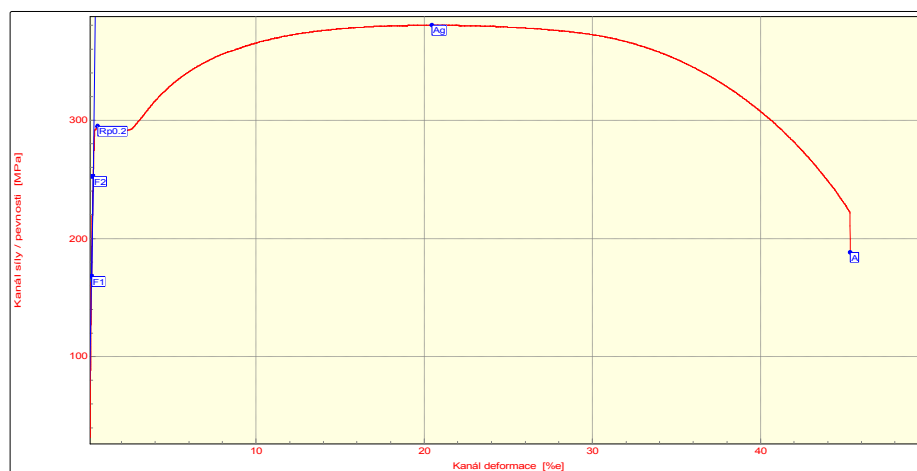
Vypracoval: : Kirschner Vít

Směr odebrání vzorku : série 5-45°

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Ag %	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %
1	20.41	293.58	380.48	47.05
2	19.80	299.80	386.36	44.62
3	20.00	294.89	380.17	45.09
4	19.41	297.28	383.19	43.77
5	19.60	292.95	377.63	44.20

Statistická hodnota	Ag %	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	19.84	295.70	381.57	44.95
Směrodatná odchylka	0.38	2.83	3.33	1.28



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : ČSN EN 10025-2 (S235JR)

Norma: : ČSN - EN 10002-1

Rozměr vzorku: : (12 x 12,5) mm

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.

Datum zkoušky: : 29. 3. 2009

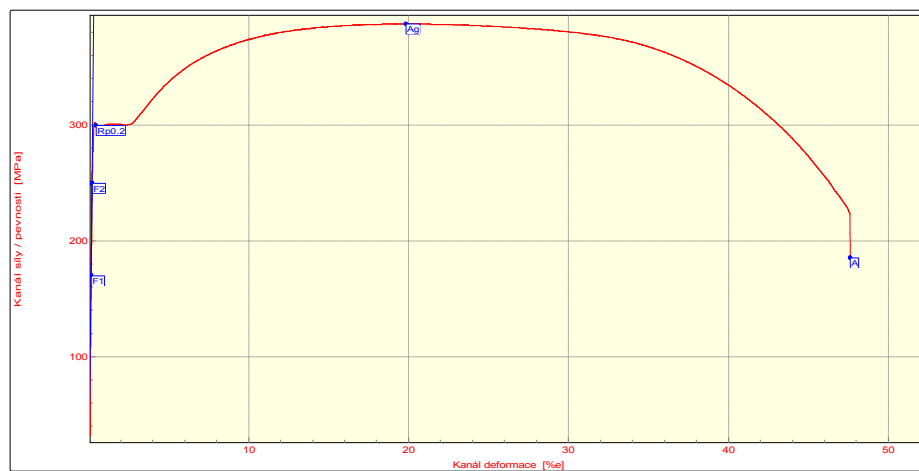
Vypracoval: : Kirschner Vít

Směr odebrání vzorku : série 5-90°

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Ag %	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %
1	19.42	306.20	380.75	41.27
2	19.87	300.06	388.13	48.40
3	19.31	299.61	387.21	47.00
4	19.50	299.44	386.91	47.46
5	19.39	297.10	383.93	47.18

Statistická hodnota	Ag %	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	19.50	300.88	385.38	46.26
Směrodatná odchylka	0.22	4.25	3.03	2.84



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : ČSN EN 10025-2 (S235JR)

Norma: : ČSN - EN 10002-1

Rozměr vzorku: : (12 x 12,5) mm

Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.

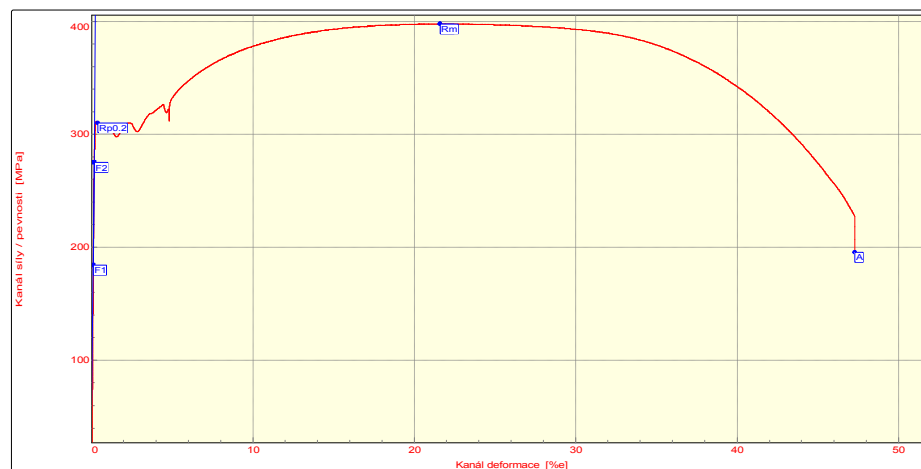
Vypracoval: : Kirschner Vít

Datum zkoušky: : 29. 3. 2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Ag %	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %
1	21.52	306.16	393.41	47.63
2	20.73	302.03	389.26	45.92
3	21.78	308.98	396.55	48.13
4	21.35	309.90	397.80	47.17
5	21.14	305.65	392.36	46.71

Statistická hodnota	Ag %	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	21.30	306.54	393.88	47.11
Směrodatná odchylka	0.40	3.10	3.40	0.85



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. O právu autorském, zejména 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnou-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL, v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které na vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 5. 6. 2009

Podpis:

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I use inform TUL of this fact, in this case TUL has the right to seek that I pay the expense invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Datum: 5. 6. 2009

Signature: